



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AERONAUTICAL ENGINEERING

POROVNÁNÍ VYBRANÝCH KRITÉRIÍ LETOVÝCH VLASTNOSTÍ NA SIMULÁTORU LETOUNU

COMPARISON OF SELECTED CRITERIA OF FLIGHT CHARACTERISTICS ON AN AIRPLANE
SIMULATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Peter Melich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Matějů

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav

Student: Peter Melich

Studijní program: Strojírenství

Studijní obor: Profesionální pilot

Vedoucí práce: Ing. Jiří Matejů

Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně učuje následující téma bakalářské práce:

Porovnání vybraných kritérií letových vlastností na simulátoru letounu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V dnešní době je na trhu dostupné množství leteckých simulátorů. Mezi nejrozšířenější patří X-Plane a Microsoft Flight Simulator. Matematický model je složen u každého z těchto simulátorů na jiném principu. Porovnání na letounu C-172SP s letovými měřeními může být přínosné například z hlediska využitelnosti simulátoru při plánování letových experimentů. Pro to je ale třeba posoudit věrnost simulace a porovnat ji s měřením.

Cíle bakalářské práce:

Vybrat vhodná kritéria letových vlastností pro srovnání. - Porovnat kritéria s vybraným simulátorem a s letovým měřením. - Zhodnotit použitelnost simulátoru pro plánování experimentů.

Seznam doporučené literatury:

EASA/CS-23: 2009. Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes. Subpart B - Flight. Amdt. 1. Koeln: EASA. 2009.

DANĚK, Vladimír. Mechanika Letu II: Letové vlastnosti. BRNO: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM,s.r.o., 2011. ISBN 978-80-7204-761-1.

ABSTRAKT

Počítačové technológie môžeme už dnes považovať za veľmi pokročilé a rozvinuté. Práve vďaka tomu máme dnes na výber desiatky komerčných leteckých simulátorov na trhu. Avšak každý letový simulátor má svoje špecifické vlastnosti a správanie a preto sa teda budem v tejto práci venovať porovnávaniu vybraných letových charakteristík vo vybranom simulátore na danom type lietadla (v mojom prípade na lietadle Cessna 172SP) a ich porovnávaniu s nameranými údajmi z reálneho prostredia. Porovnanie dát nám ukáže, ako približne je simulátor schopný vyhodnocovať vstupy od užívateľa a simuláciou sa podobat' skutočným podmienkam.

KĹÚČOVÉ SLOVÁ

letový simulátor, počítačové technológie, dynamická stabilita, ovládacie plochy, fugoidné kmitanie

ABSTRACT

As of today, we might consider PC technologies as very progressive and advanced. Due to this fact, we have numerous commercial flight simulators available on the market nowadays. However, each flight simulator has it's own specific characteristics and behaviour and that's why I'm going to compare selected flight characteristics in the chosen flight simulator on a chosen aircraft type (Cessna 172SP in my case) and it's comparison with measured data from real-life environment in this thesis. Data comparison will show us how accurately simulator responds to inputs from the user and if the simulation is similar in relation to real conditions.

KEYWORDS

flight simulator, computer technologies, dynamic stability, control surfaces, fugoid oscillation

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MELICH, Peter. *Porovnání vybraných kritérií letových vlastností na simulátoru letounu*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132711>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Jiří Matějů.

POĎAKOVANIE

Chcel by som sa veľmi pekne poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Jiřímu Matejů za odborný dohľad a každú jednu radu a pomoc s touto prácou, vždy sa mi snažil danú problematiku čo najlepšie vysvetliť a porozumieť jej. Ďalej by som sa chcel poďakovať mojim profesorom, rodine a priateľom za všetku podporu počas písania tejto práce.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že som celú bakalársku prácu napísal samostatne pod vedením školiteľa Ing. Jiřího Matějů s použitím uvedenej literatúry a zdrojov v zozname.

V Brne dňa 20.5.2021

.....

Melich Peter

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Letecké simulátory	2
2.1	História	2
2.2	Bezplatné simulátory	3
2.2.1	Flight-Gear	3
2.2.2	GEO-FS	3
2.3	“Freemium“ simulátory	4
2.3.1	X-plane	4
2.4	Platené simulátory	5
2.4.1	Microsoft Flight Simulator	5
2.4.2	Prepar3D.....	6
3.1	Certifikačné špecifikácie EASA	7
3.2	CS-23	7
3.3	Sprievodca letovými skúškami (FTG) podľa CS-23	7
3.3.1	Postupy – Pozdĺžne s krátkou periódou	7
3.3.2	Postupy – Pozdĺžna dynamická stabilita pri dlhej perióde (fugoidné).....	7
4	Letún Cessna 172 Skyhawk	8
4.1	Vývoj a začiatky	8
4.2	Charakteristika letúna	9
4.2.1	Rozmery	9
4.2.2	Hmotnosti	9
4.2.3	Pohonná jednotka	9
4.2.4	Výkony	9
4.2.5	Pohľad na ovládacie prvky	10
4.2.6	Schematický pohľad (predný, bočný a chrbtový pohľad)	11
5	Stabilita letúna	12
5.1	Dynamická stabilita	12
5.1.1	Pozdĺžna dynamická stabilita	12
5.1.2	Stranová (priečna a smerová) dynamická stabilita.....	13
5.1.3	Kvantitatívne kritéria dynamickej stability letúna	14
5.2	Ovládacie plochy	15
5.2.1	Výchylka krídeliek	15
5.2.2	Výchylka výškového kormidla.....	16
5.2.3	Výchylka smerového kormidla	18

6	Analýza letu s programom ArduPilot	19
6.1	ArduPilot	19
6.2	Software-in-the-loop (SITL).....	19
6.3	MavProxy	20
6.4	MissionPlanner	20
7	Experimentálny let v X-plane	22
7.1	Technológia simulácie	22
7.2	Skúška na letúne Cessna 172SP	22
7.3	Vyhodnotenie merania.....	24
7.4	Let s MTOW 1081 kg.....	25
7.4.1	Analýza fugoidálnych kmitov	25
7.4.2	Analýza rýchlych kmitov	26
7.4.3	Výsledky.....	27
7.5	Let s MTOW 1068.5 kg.....	27
7.5.1	Analýza fugoidálnych kmitov	27
7.5.2	Analýza rýchlych kmitov	29
7.5.3	Výsledky:	30
8	Meranie z reálneho prostredia.....	31
8.1	Let s MTOW 1068,5 kg.....	31
8.1.1	Analýza fugoidálnych kmitov	31
8.1.2	Analýza rýchlych kmitov	31
8.2	Let s MTOW 1081 kg.....	32
8.2.1	Analýza fugoidálnych kmitov	32
8.2.2	Analýza rýchlych kmitov	32
8.2.3	Výsledky.....	33
9	Záver:	34
	Zoznam použitých zdrojov.....	35
	Zoznam obrázkov.....	38
	Zoznam použitých skratiek.....	40
	Zoznam použitých symbolov a značiek.....	40

1 Úvod

Letecký priemysel a počítačové technológie dnes môžeme spolu považovať za dve neoddeliteľné odvetvia, nakoľko letectvo dnešnej doby by sa bez pokrokov v informačných technológiách a počítačoch všeobecne len ťažko priblížilo takému pokroku a úrovni, za ktorú vďačí dnes. Revolúcia v používaní IT prvkov a automatizácia priniesla do letectva zvýšenú bezpečnosť či možnosť krátenia vedenia trás, čo malo za priamy následok nižšiu spotrebu paliva, skrátenie letových dôb a tým pádom vyššiu finančnú a personálnu efektívnosť.

S postupným rozmachom súkromných počítačov začiatkom 80. rokov minulého storočia začali leteckí a inžinieri aj laici inklinovať k myšlienke vytvorenia letových simulátorov, ktoré by bežali na hocijakom počítači a v súkromí domova. Ako príklad si môžeme uviesť najznámejší simulátor Microsoft Flight Simulator, ktorý je k dispozícii na trhu už od roku 1982. Tieto nápady sa ukázali ako úspešné a už koncom 90. rokov bolo na trhu množstvo letových simulátorov, od bezplatných cez platené, ktoré sú dodnes podporované.

Letové simulátory sa dnes výrazne líšia, či už princípom simulácie letu alebo použitou grafikou a scenériou. Každý simulátor pracuje na rozdielnych herných engine-och a s rôznymi matematicko-fyzikálnymi modelmi letúna. Napríklad spoločnosť Microsoft využíva vo svojich hrách štandard DirectX a X-Plane používa štandard OpenGL a technológiu BET. To znamená, že každý simulátor má vlastný špecifický výkon a tým pádom aj priebeh simulácie a presnosť údajov. Z toho dôvodu som sa rozhodol vybrať jeden simulátor a porovnať vybrané letové charakteristiky a správanie sa letúna vo virtuálnom a skutočnom prostredí. Podľa toho môžeme určiť akú má presnosť letová simulácia voči realite.

Poskytnúť dáta a sledovať let, či už v letovom simulátore alebo v skutočných lietadlách dokáže aj autopilotová open-source sada AurdPilot, ktorá je v základe bezplatná a detailnejšie sa o nej zmienim ďalej v práci.

Z množstva dostupných letových simulátorov som sa rozhodol podrobne otestovať práve simulátor X-Plane od firmy Laminar Research, nakoľko poskytuje najvhodnejšie podmienky a prostredie na zaznamenávanie a analýzu letových dát. Vo svojej práci som sa zamerlal na porovnanie vybraných letových kritérií v prostredí simulátoru X-Plane a následne som výsledky porovnal s reálnym meraním. Ako skúmanú oblasť som sa rozhodol využiť dynamickú stabilitu lietadla, konkrétne som sa sústredil na vybudené fugoidálne a rýchle kmity po impulznom vychýlení výškového kormidla, nakoľko okrem samotných nameraných hodnôt výchýliek kormidiel môžeme vidieť presnosť simulátoru v tom, ako sa po impulznom vychýlení výškového kormidla bude letový model správať v čase.

Virtuálne meranie prebiehalo vo forme dvoch testovacích letov z letiska Brno - Tuřany v simulátore X-Plane, oba lety boli uskutočnené s odlišnou maximálnou vzletovou hmotnosťou a príslušnými podmienkami. Nasledovné získavanie hodnôt z reálneho prostredia prebiehalo na rovnakom postupe.

2 Letecké simulátory

Letecké simulátory sú programy, ktoré umožňujú vytvoriť virtuálny let vo virtuálnom prostredí. Využitie nachádzajú najmä medzi pilotmi (kvôli výcviku), konštruktérmi (napr. pri vyvíjaní lietadla) alebo inžiniermi (skúmanie vlastností lietadla jeho ovládanie). Pre bežných užívateľov sú k dispozícii tzv. amatérske letecké simulátory, ktoré sú voľne dostupné, kde si ktokoľvek môže vyskúšať pre predstavu ako ovládať lietadlo, plánovať trate, komunikáciu s ATC a atď. Vo svojej práci sa budem sústreďovať a pracovať ďalej práve s týmito amatérskymi simulátormi. Na trhu sa nachádza mnoho takýchto simulátorov, od bezplatných cez tzv. freemium až po plne platené, avšak, vo všeobecnosti platené simulátory majú lepšie vlastnosti a svojím výkonom sa dokážu priblížiť klasickým tréningovým. Technicky zdatní užívatelia si už vedú v pohodlí domova na základe dostupných simulátorov vytvoriť a vyskladať fiktívny cockpit, ktorý vie byť plne ovládateľný.

2.1 História

Letecké simulátory tak ako ich poznáme dnes, prešli od svojich počiatkov mnohými zmenami a vylepšeniami. Prvý krát, kedy sa podarilo naprogramovať a vyvinúť funkčný letecký simulátor bolo koncom 70. rokov 20. storočia softwarovým inžinierom menom Bruce Artwick a Stu Moment a niesol názov *FS1 Flight Simulator*. *FS1* podporoval štvorfarebné a monochromatické displeje, na obrazovke dokázal zobrazovať dva letové prístroje a to rýchlomer a výškomer. Vydali ho vtedy pod spoločnou firmou Sublogic v roku 1979 pre počítač Apple II.

Produkt sa tešil mimoriadnej obľube, v roku 1981 bol označený ako najpredávajúcejší sa titul pre Apple. Konkurenčný Microsoft si popularitu programu všimol a bol si vedomý Artwickových poznatkov a skúseností ohľadom letovej simulácie a neskôr, na začiatku 80. rokov sa na neho obrátil so žiadosťou o vytvorenie simulátoru, ktorý by bol kompatibilný na počítače značky IBM. Tak sa aj stalo a v novembri 1982 bol uvedený na trh *Microsoft Flight Simulator*. Ten zo sebou priniesol sadu vylepšení; obsahoval reálne lietadlo Cessna 182, 20 letísk, 9 rôznych pohľadov, simuláciu počasia a prístrojová doska už bola schopná zobrazovať 8 prístrojov. Od toho istého roku bolo použitie názvu *Flight Simulator* pre počítače IBM licencované špeciálne pre Microsoft. Sublogic pokračovala ďalej vo vývoji simulátorov a v roku 1983 vydala *Flight Simulator II (Microsoft Flight Simulator 2.0)* pre počítače IBM a *Jet* (1985) a ich distribúciu na rôzne vtedajšie počítače ako napríklad Commodore 64, Atari 800, Atari ST atď. [1]

Artwick sa rozhodol v roku 1988 zo Sublogicu odísť a ponechať si svoje autorské práva na značku *Flight Simulator* a založil si inú firmu ktorá sa sústredila na vývoj simulátoru spolu s Microsoftom. V januári 1995 boli firma a aj autorské práva na značku *Flight Simulator* Microsoftom odkúpené a Artwick ostal v spoločnosti ďalej ako konzultant. Postupne sa tak začal monopol Microsoftu na trhu s leteckými simulátormi na 20 rokov.

2.2 Bezplatné simulátory

2.2.1 Flight-Gear

S realizáciu myšlienky bezplatného leteckého simulátoru prišiel v roku 1996 pán David Murr po tom ako mu prišlo niekoľko podnetov od ostatných ľudí, ktorý žiadali alternatívu ku vtedajším plateným simulátorom. Murr pôvodne vypísal na internete zákazku, kde navrhoval vytvorenie simulátoru, ktorý by bol ľahko dostupný cez internet. Podmienkou bolo, aby bol program založený na “open-source” kóde, čiže na vývine a aktualizáciách simulátoru by mohol pracovať hocikto a dobrovoľne. V roku 1997 sa podarilo úspešne uviesť do používania simulátor pod menom Flight-Gear, ktorý pracuje dodnes na programovacom štandarde OpenGL. Flight-Gear je takisto pravidelne aktualizovaný a je kompatibilný s väčšinou súčasných popredných operačných systémov ako napríklad Microsoft Windows, Apple MacOS alebo Linux. [2] [24]

2.2.2 GEO-FS

Vznikol v roku 2010 pod hlavičkou tvorcu Xaviera Tassina ako GE-FS (Google Earth Flight Simulator), fungujúc na princípe online zobrazovania scenérie z programu Google Earth v prehliadači pomocou doplnku (plug-in). Podmienkou bolo, aby bol Google Earth v počítači už vopred nainštalovaný. Časom ale Google plug-in odstránil, čo vyvolalo problém, ktorý sa vyriešil poskytnutím scenérie pomocou menej rozvinutej open-source platformy Cesium, zaoberajúcou sa vytváraním 3D geopriestoru.

V súčasnosti je v simulátore na výber niekoľko typov lietadiel z rôznych kategórii, ktoré vytvára samotná komunita Geo-FS. K dispozícii sú napríklad Zlín Z-50 či Concorde. Simulátor funguje online, hráč ovláda letúny v tzv. “multi-player” priestore, ktorého počasie a poveternostné podmienky sú pravidelne aktualizované cez stránku openweathermap.org, poskytujúcu údaje o skutočnom atmosférickom stave.

Geo-FS je zadarmo dostupný na ľubovoľnom prehliadači a platforme. Takisto je podporovaný aj na mobilných zariadeniach s operačnými systémami Apple iOS a Google Android. Za relatívne malý príplatok je ešte možné mať prístup k rozšírenej scenérii s vysokým rozlíšením od spoločnosti Bing. [3]



Obr. 2-1 Screenshot letúna Cessna 172 počas letu v simulátore GEO-FS

2.3 “Freemium” simulátory

2.3.1 X-plane

Simulátor X-plane bol uvedený na trh v roku 1995 pod taktovkou americkej firmy Laminar Research. Vlastníkom firmy je jej zakladateľ a vývojár Austin Meyer, ktorý je zároveň tvorcom simulátoru X-plane. Meyer sa myšlienkou vytvorenia simulátoru na základe do vtedy nepoužíwanej technológie, tzv. “blade element theory” zaoberal už počiatkom 90. rokov minulého storočia. [4]

Princípom činnosti X-plane je načítanie geometrického tvaru letúna a zistením ako daný letún bude lietať. To je možné využitím vyššie spomínaného matematického procesu blade element theory, čoho úlohou je rozdelenie lietadla na niekoľko malých častí a následným zisťovaním pôsobiacich síl na každú jednu časť niekoľkokrát za sekundu. Tieto vypočítané sily sa potom prevedú na zrýchlenia, ktoré sa integrujú a dostanú sa údaje o polohe a rýchlosti. [5]

X-Plane patrí medzi najúspešnejšie a najviac rozšírené letecké simulátory medzi leteckými nadšencami, ktorí si pochvaľujú jeho výkon, možnosti a presnosť. Obsahuje podrobné trojrozmerné scenérie pre viac ako 13 000 letísk po celom svete, 9 predvolených letúnov vybavených 3D cockpitom a dokáže simulovať reálne počasie na základe aktuálnych údajov. Simulátor umožňuje hru typu multi-player a jeho najnovšia verzia – X-plane 11 už podporuje aj zariadenia zobrazujúce virtuálnu realitu. Na vlastné si vyskúšanie simulátora je možné zadarmo stiahnuť aj tzv. “demo” verziu. [6]

Je dostupný a kompatibilný na všetky popredné počítačové platformy (Microsoft Windows, Apple MacOS a Linux) a takisto aj na mobilné platformy, kde je zadarmo k dispozícii ale s obmedzeným výberom lietadiel, scenérie a úloh (misii). Na odomknutie jednotlivých položiek je už ale potrebné jednorazovo zaplatiť konkrétnu sumu.

Existuje aj profesionálna verzia tohto simulátoru, nazvaná X-Plane Pro s použitím na komerčné účely a výcvik resp. tréning posádok. Americký federálny letecký úrad (FAA) využíva svoje postupy na certifikáciu výcvikových simulátorov používajúcich X-plane a určuje vlastné dodatočné požiadavky (napríklad na hardware) na ich prevádzku. [7]

2.4 Platené simulátory

2.4.1 Microsoft Flight Simulator

Letový simulátor od americkej korporácie Microsoft sa od svojho debutu v roku 1982 hneď stal najpopulárnejším a najobľúbenejším letovým simulátorom z pomedzi ostatných po dobu 35 rokov. Bolo tomu tak kvôli pravidelným aktualizáciám, vydávaním nových verzií simulátoru pravidelne každé 2 až 3 roky, široká podpora doplnkov od tretích strán a veľká komunita nadšencov a fanúšikov.

Microsoft Flight Simulator bol prvotne vydaný ako verzia 1.0 pre počítače IBM. O dva roky neskôr v roku 1984 ho nasledovala čiastočne farebná (4 základné farby) verzia s podporou počítačovej myši 2.0, v roku 1988 prišiel Microsoft Flight Simulator 3.0, s podporou 16 farebnej EGA (Enhanced Graphics Adapter) grafiky. Neskôr boli vydané ďalšie hlavné verzie 4.0, 5.0, 98, 2000, 2002, 2004: A Century of Flight. Simulátor sa tak časom dočkal vylepšení ako sú lepšia ovládateľnosť, lepšia grafika, stále sa zvyšujúci počet dostupných letúnov na výber, možnosť viacerých pohľadov na a z letúna (napr. podpora virtuálneho 3D pohľadu na cockpit od verzie 2002), komunikácia s ATC, podpora doplnkov tretích strán a posledné 3 verzie so sebou priniesli simuláciu počasia aj s možnosťou simulácie reálneho počasia aké je na danom mieste v danom momente podľa dostupných dát. [8]

Donedávna posledný uvedený titul zo série od spoločnosti Microsoft, Microsoft Flight Simulator X (skrátene FSX), bol vydaný ešte v roku 2006 a to v troch edíciach (Standard, Deluxe a Gold) s podporou DirectX a kompatibilitou na Windows XP Service Pack 2, Windows Vista a novší. Vtedy Flight Simulator vyšiel prvýkrát aj na formátoch DVD. FSX sa postupom času dočkal aktualizácii v podobe dvoch tzv. “service packs” a príchodom novej podverzie nazvanej FSX: Acceleration. V roku 2014 prišla digitálna platforma Steam, zaoberajúca sa distribúciou video hier a titulov, s mierne vylepšenou verziou simulátoru FSX s podnázvom Steam Edition, ktorá je dostupná cez internet. FSX bol takisto posledný vydaný simulátor z dielne Aces Game Studio, ktorý vydala spoločnosť Microsoft a to z dôvodu ukončenia činnosti Aces Game Studio. [9]

V polovici roka 2019 padlo oznámenie Microsoftu o vývoji novej verzie letového simulátoru zo svojej známej série po 13 ročnej prestávke. S jednoduchým názvom, Microsoft Flight Simulator, vyšiel na trh nový simulátor v auguste roku 2020 a dočkal sa komerčného aj kritického úspechu. Na vývoji spolupracoval s francúzskym štúdiom Asobo Studio. Generovanie grafiky po novom beží na AI technológii Microsoft Azure, opierajúcu sa o dvojpetabytovú databázu satelitných snímok z platformy Bing Maps. Na výber je 20 až 35 letúnov, konkrétny počet závisí od edície simulátoru (Standard, Deluxe a Premium Deluxe). Na výber sú lietadlá ako Diamond DA-40, Cirrus SR-22, Airbus A320neo alebo Boeing 787-10 Dreamliner, Je k dispozícii na platformy ako sú Microsoft Windows a Xbox a je kompatibilný so štandardom OpenXR podporujúcim virtuálnu realitu. [10] [11]



Obr. 2-2 Screenshot z virtuálneho cockpitu lietadla Boeing 737-800 v simulátore Microsoft Flight Simulator X

2.4.2 Prepar3D

Príchod simulátoru od amerického výrobcu lietadiel Lockheed Martin podmienilo sprístupnenie vizuálno-simulúcej platformy Microsoft ESP od firmy Aces Game Studio, ktorá je vlastnená samotnou firmou Microsoft. Pomocou Microsoft ESP bolo umožnené aj ostatným vývojárom pracovať na vlastných inováciách a produktoch na základe technológie z Microsoft Flight Simulator. V roku 2009 nasledoval príchod dohody medzi spoločnosťami Lockheed Martin a Microsoft o ďalšom rozvíjaní a úpravách platformy Microsoft ESP a v roku 2010 Lockheed Martin oznámil príchod vlastného simulátora nazvaného Prepar3D, založenom na zdrojovom kóde ESP. [12]

Keďže Prepar3D je postavený na rovnakom jadre ako Microsoft Flight Simulator, poskytuje tak rovnako ako konkurenčný simulátor od Microsoftu zaužívaný a stabilný štandard simulácie, pravidelné aktualizácie, podporu doplnkov a doplnkových funkcií. Ponúka okrem iného aj pohľad na 40 miest s vysokým rozlíšením a 3D kópiami budov špecifických pre dané mesto a je prispôsobený na použitie pri virtuálnej realite. [13]

Dá sa voľne zakúpiť a je zatiaľ využitelný iba pre počítačové platformy. Má široké využitie v mnohých odvetviach, hlavne je obľúbený ako výcviková resp. výučbová pomôcka pre pilotov, armádu alebo akademickú obec. Vďaka stabilnej podpore zo strany Lockheed, pravidelnými aktualizáciami softwaru a podobnosťou s Flight Simulator sa z neho (spolu s X-plane) stal najpoužívanější simulátor medzi užívateľmi v roku 2018. [6]

3 Požiadavky na skúšobné lety podľa CS-23

Každý letún, ktorý chce byť certifikovaný pod taktovkou európskej agentúry pre bezpečnosť v letectve - EASA, sa musí podrobiť skúškam a splniť sledované kritéria, tak ako sú stanovené a podmienené v predpisoch o certifikačných špecifikáciách resp. ich adekvátnych ekvivalentoch.

3.1 Certifikačné špecifikácie EASA

Certifikačné špecifikácie (CS) sú nezáväzné technické normy, ktoré prijala EASA na splnenie základných požiadaviek Základného nariadenia EASA. Ustanovenia CS sú vyvíjané po konzultácii so zainteresovanými stranami z odvetvia a prípadne v spolupráci s priemyselnými orgánmi, ako je Európska organizácia pre vybavenie civilného letectva (EUROCAE). Súlad s CS je nevyhnutnou podmienkou na získanie príslušného regulačného schválenia alebo certifikácie. Materiál CS sa preto môže považovať za záväzný, ak sa berie do úvahy so záväznými pravidlami, ktoré vyžadujú súlad s CS. [14]

3.2 CS-23

CS-23 patrí medzi jeden z certifikačných špecifikácií agentúry EASA, vzťahujúci sa na ľahké letúny kategórie normálne, cvičné, akrobatické a pre zbernú dopravu – tzv. commuter. Konkrétne sem patria letúny s MTOW do 5 700 kg s kapacitou do 9 cestujúcich s jednou pohonnou jednotkou, čo splňuje definíciu letúnov triedy B podľa predpisu EU-OPS. Radia sa sem aj letúny tzv. commuter, ktoré majú spĺňať MTOW do 8168 kg, priestor pre maximálne 19 cestujúcich a dve pohonné jednotky.

Práve najväčšia časť tréningu profesionálnych pilotov je vykonávaná na letúnoch tejto kategórie. Patria sem okrem mnou vybranej Cessny 172 aj letúny ako Diamond DA20, Diamond DA42, Piper PA-28 Cherokee, Tecnam P2006T alebo Beechcraft King Air.

3.3 Sprievodca letovými skúškami (FTG) podľa CS-23

3.3.1 Postupy – Pozdĺžne s krátkou periódou

Skúšky pozdĺžnej dynamickej stability pre krátku periódu sú vykonávané pohybom alebo pulzom pozdĺžneho riadenia o rýchlosti a stupni, ktoré zaistia reakciu klopenia lietadla s krátkou periódou. Prvotné vstupy by mali byť malé a konzervatívne pomalé, pokiaľ nebude známe viac o reakcii lietadla. Postupne by sa vstupy mali dostatočne zväčšovať, aby bolo možné jasnejšie vyhodnotiť oscilačné reakcie lietadla a počet prekročení podmienok rovnovážneho stavu. [15]

3.3.2 Postupy – Pozdĺžna dynamická stabilita pri dlhej perióde (fugoidné)

Skúšky fugoidného režimu sa vykonávajú tak, že sa letún privedie k značnému vychýleniu z rýchlosti vyváženia (asi +10% by malo stačiť) vstupom výškového kormidla a potom sa mu umožní oscilácia rýchlosti, zvislej rýchlosti stúpania a klesania, nadmorskej výšky a pozdĺžneho sklonu, bez toho aby sa pilot pokúšal obmedziť akúkoľvek premennú, pokiaľ nedôjde k prekročeniu vzdušnej rýchlosti, násobku zaťaženia či iných obmedzení. [15]

4 Letún Cessna 172 Skyhawk

Tento mimoriadne obľúbený letún si drží prvenstvo ako najpredávanejšie lietadlo všetkých čias. Bol vyvinutý v 50. rokoch minulého storočia americkou spoločnosťou Cessna (dnes tvorí dokopy spolu s inými výrobcami lietadiel – Beechcraft a Hawker Aircraft konzílium Textron Aviation).

Skyhawk zožal hneď po uvedení na trh instantný úspech, ktorý pretrváva dodnes. Toho dôkazom je fakt, že model 172 je od uvedenia do prevádzky stále vo výrobe a do dnešného dňa bolo predaných viac ako 44 tisíc letúnov tohto typu.

4.1 Vývoj a začiatky

V 50. rokoch minulého storočia začala Cessna testovať rôzne vylepšenia u svojho stávajúceho modelu 170 a na jeho základe vyvinula a následne certifikovala nový model 172. Svoj prvý let tak 172 absolvovala v roku 1955, ešte ako modifikovaná verzia modelu 170, označená 170C. Hlavný rozdiel bol však v použití trojkolového podvozku na 172 namiesto bežne používaného konvenčného podvozku (taildragger) pri modeli 170. Zmenami ešte prešiel tvar zvislej chvostovej plochy (viac šípový tvar), veľkosť výškových kormidiel a postupne sa vystriedal starší a menej výkonný typ motora – piestový šesťvalcový Continental C145 (O-300) za novšie typy ako napríklad Lycoming O-360. V roku 1956 bol tým pádom uvedený na trh model 172, ktorý priamo nahradil model 170, ktorého výroba sa tak automaticky ukončila. [16]



Obr. 4-1 Letún Cessna 172SP Skyhawk [17]

4.2 Charakteristika letúna

Cessna 172 Skyhawk je malý jednomotorový celokovový hornoplošník s pevným krídlom a trojkolovým podvozkom so všeobecným využitím. Podvozok je pevný s predným kolesom. Krídla s profilom NACA 2412 sú podopreté vzperami a v každom krídle je zároveň vstavaná jedna palivová nádrž. Letún je poháňaný jedným piestovým spaľovacím motorom typu Continental alebo Lycoming s vrtul'ou s pevným uhl'om nastavenia listov. Posádku môžu tvoriť nanajvýš 4 ľudia; jeden pilot a maximálne 3 cestujúci. [18]

4.2.1 Rozmery

Počet sedadiel:	4	
Dĺžka:	8,28	m
Rozpätie:	11,00	m
Výška:	2,72	m
Plocha krídla:	16,17	m ²
Priemer vrtule:	1,93	m

4.2.2 Hmotnosti

Prázdna hmotnosť:	754,32	kg
Maximálna vzletová hmotnosť (MTOW):	1156,66	kg
Maximálna pristávacia hmotnosť (MLW):	1156,66	kg
Celkový objem palivových nádrží:	211,98	l

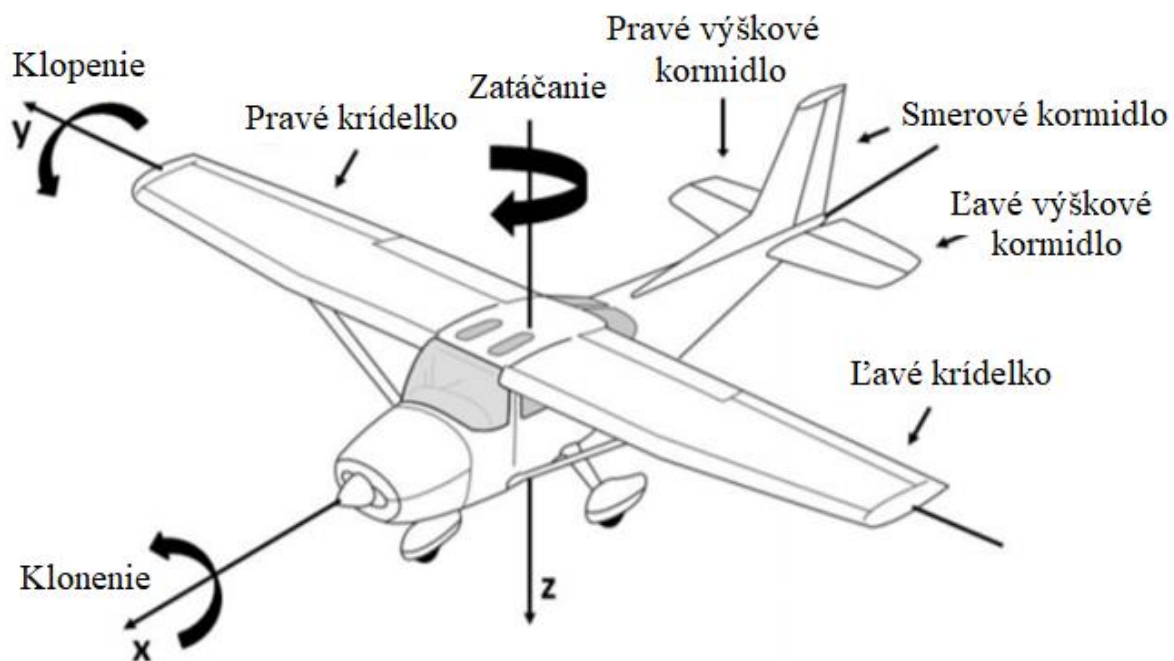
4.2.3 Pohonná jednotka

Názov:	Textron Lycoming IO-360-L2A
Typ:	plochý (boxer), štvôr-taktný
Chladenie:	vzduchom
Počet valcov:	4
Výkon:	134 kW (pri 2700 RPM)
Palivo:	AVGAS

4.2.4 Výkony

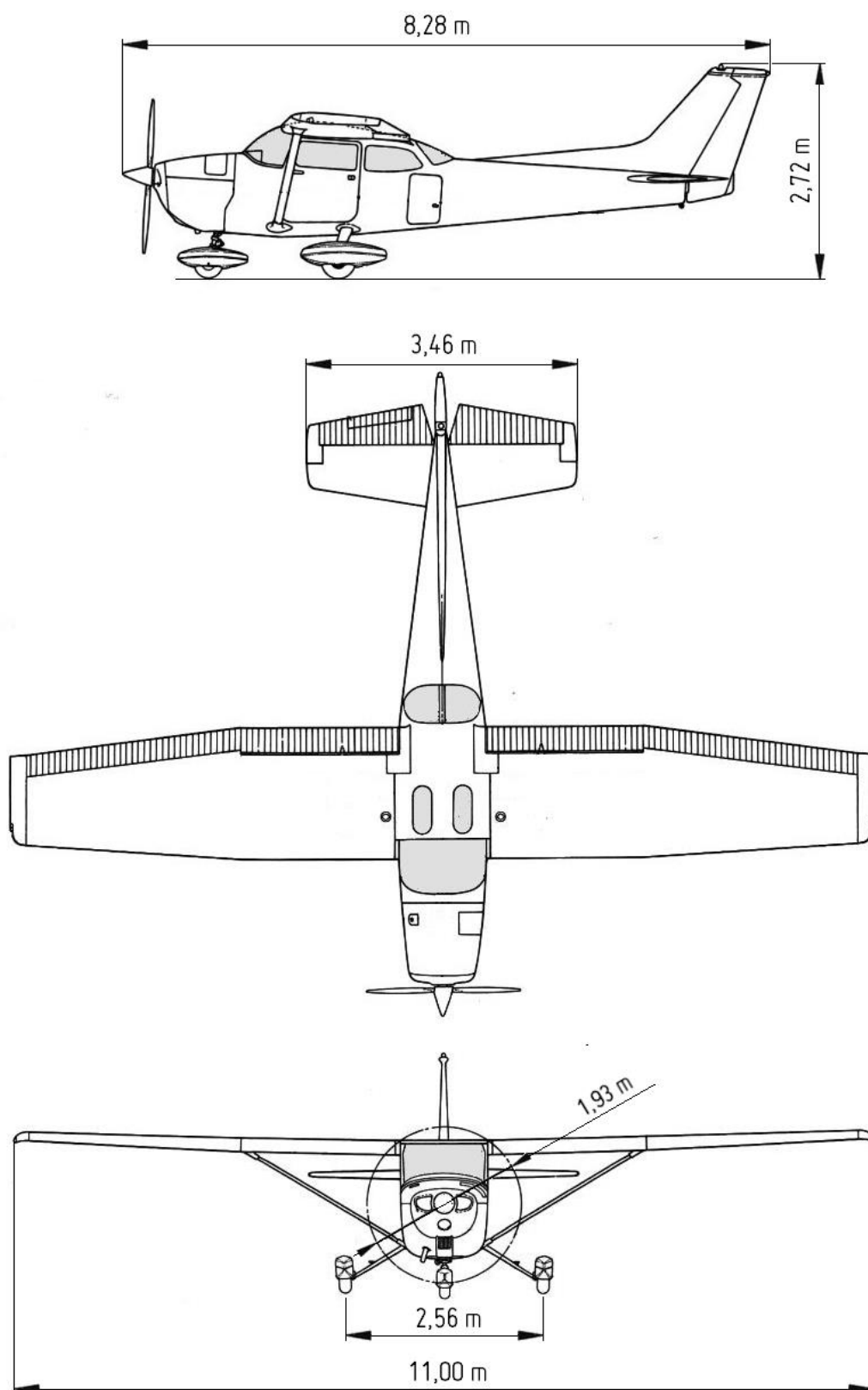
Cestovná rýchlosť:	124	kts
Maximálna neprekročiteľná rýchlosť V (NE):	160	kts
Pádová rýchlosť (s plnými klapkami):	48	kts
Stúpavosť:	3,71	m/s
Dolet:	1181	km
Maximálny dostup:	4267	m

4.2.5 Pohľad na ovládacie prvky



Obr. 4-2 Ovládacie prvky na letúne Cessna 172SP Skyhawk [19]

4.2.6 Schematický pohľad (predný, bočný a chrbtový pohľad)



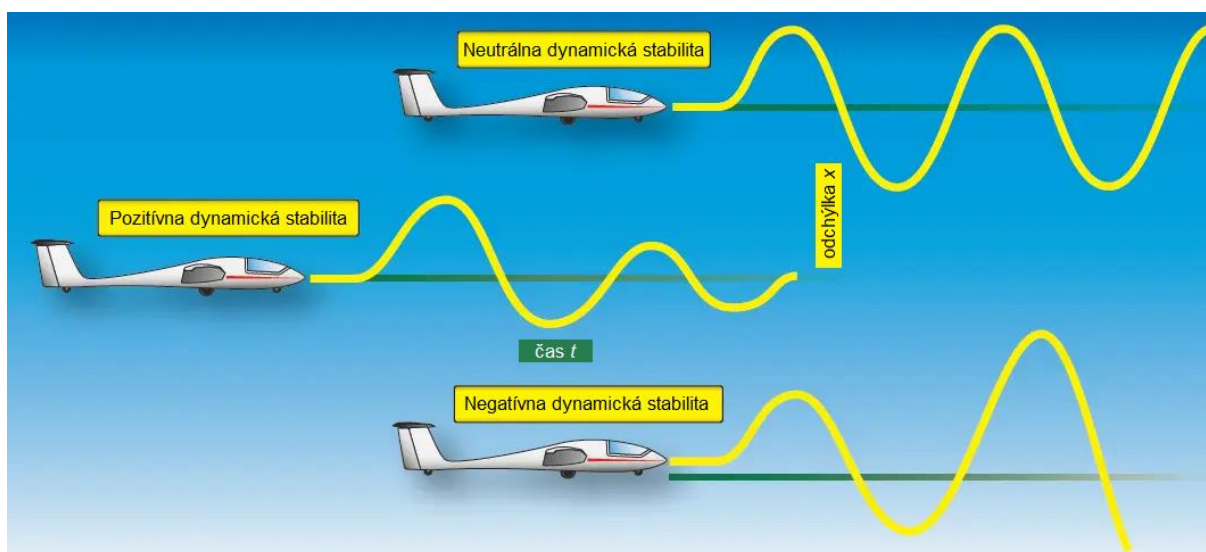
Obr. 4-3 Priestorový náčrt letúna Cessna 172SP Skyhawk

5 Stabilita letúna

5.1 Dynamická stabilita

Stabilita je schopnosť letúna zachovať si pôvodný režim letu po vyrušení zmenou výchylky kormidiel alebo turbulenciou. Pre lietadlá existujú dva všeobecné typy stability a to statická a dynamická stabilita. Dynamická stabilita berie do úvahy, na rozdiel od tej statickej, zmeny polohy letúna pozorovaného v čase. Vratné momenty môžu byť až tak silné, že namiesto vrátenia letúna do rovnovážnej polohy vyvolajú kmitavý pohyb, ktorý vznikne prekmitnutím letúna cez rovnovážnu polohu.

Rozlišujeme tri typy dynamickej stability a to negatívna, neutrálna a pozitívna. Pozitívna dynamická stabilita hovorí o kmitoch, ktoré sú postupom času tlmené. Môžeme si uviesť príklad práve na Cessne 172. Ak máme letún vo vyváženej polohe a letíme vo vodorovnej polohe, pritiahnutie kormidla smerom k nám zdvihne nos hore a jeho následné pustenie zas spôsobí okamžitý náklon nosa smerom nadol. Opätovný náklon nosa smerom nahor je už potom menší než podľa pôvodného vychýlenia až sa postupom času 172 dostane do pôvodnej polohy. V prípade, ak sa amplitúda kmitania letúna s časom zvyšuje a letún sa značne vychýľuje z pôvodnej trajektórie, hovoríme o negatívnej dynamickej stabilite. Ak je kmitanie letúna ustálené a letún udržiava svoju trajektóriu, hovoríme o neutrálnej dynamickej stabilite. [20]



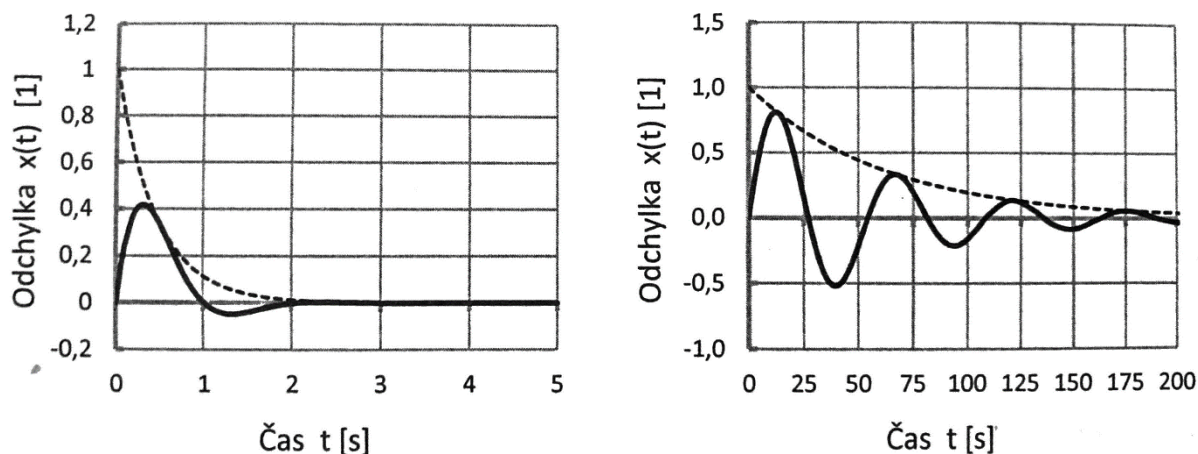
Obr. 5-1 Typy dynamickej stability a ich prejavy [21]

5.1.1 Pozdĺžna dynamická stabilita

Po vychýlení letúna z pôvodného režimu letu a následný vznik vratných klopových momentov ešte nezaručuje, že sa letún po určitom prechodovom pohybe vráti do referenčného stavu, z ktorého bol istou vonkajšou príčinou vyvedený. Uvedieme si to na prípade rozbíhavého (divergentného) pohybu. Vratné momenty môžu byť natoľko silné, že spôsobia opačný efekt – letún prejde cez rovnovážnu polohu na opačnú stranu s ešte väčšou výchylkou, ktorá sa môže s časom ďalej zväčšovať. Istou alternatívou môže byť jednostranový rozbíhavý pohyb alebo zbíhavý (aperiodický) pohyb. Typ pohybu, ktorý môže nastať sa odvíja od množstva parametrov a charakteristík letúna, tj. charakteristík hmotnostných (centráž a rozloženie hmotnosti na letúne) aj aerodynamických (aerodynamické tlmenie) a podobne.

Po poruche rovnovážneho režimu letu letúna je jeho výsledný pozdĺžny pohyb zložený z dvoch kmitavých zložiek, resp. iba z jednej kmitavej zložky a dvoch nekmitavých (aperiodických) pohybov. Častejšie pozorujeme prvý prípad, teda obvykle sledujeme dva kmitavé pohyby. Jedná sa o tzv. rýchle a pomalé kmitavé pohyby. Ako názov napovedá, pri rýchlom kmitavom pohybe jeperióda kmitov krátka, od zlomkov sekúnd až po 3 až 5 sekúnd. Je charakterizovaný výraznejšou zmenou uhlu nábehu, zatiaľ čo sa rýchlosť nestačí meniť. Druhý pohyb, tzv. pomalý kmitavý pohyb má zas naopak, pomerne dlhú periódu kmitov, od 20 sekúnd až po pár minút. Pri tomto pohybe sa významnejšie mení rýchlosť a pozdĺžny sklon, pričom sa uhol nábehu takmer nemení. Tento pohyb sa inak nazýva aj ako tzv. fugoidný pohyb. Znáznornenie týchto pohybov letúna je uvedené na obrázku 5-2.

Na prevádzku letúna by mierna nestabilita fugoidných kmitov nemala byť nezdolateľnou prekážkou, preto sa požaduje iba to, aby bola potrebná doba na zdvojnásobenie amplitúdy fugoidného kmitavého pohybu adekvátne dlhá tak, aby pilot prípadné odchýlky podvedome vyrovnal a tým pádom sa nezvyšovala záťaž na pilota. [22]



Obr. 5-2 Časový priebeh odchýlky (amplitúdy) pri rýchlych kmitoch (vľavo) a pri pomalých (fugoidných) kmitoch (vpravo) [23]

5.1.2 Stranová (pričná a smerová) dynamická stabilita

Ak nastane porucha rovnovážneho režimu letu charakterizovaná stranovými pohybmi, nastane dynamická odozva, ktorá môže byť periodickým, aperiodickým resp. kombinovaným stranovým pohybom v čase. Výsledný stranový pohyb pri klasickom letúne pozostáva obvykle z troch typických zložiek:

Rýchly klonivý aperiodický pohyb, ktorý je spravidla silne tlmený. Pilot si ho nestačí ani uvedomiť a bežne nerobí žiadne problémy.

Špirálový pohyb.- spravidla nestabilný aperiodický pohyb, ktorý nazývame špirálová divergencia. Divergencia je však pomalá. Doba nárastu odchýlky na dvojnásobok je obvykle taká, že neujde pozornosti pilota a ten ju podvedome eliminuje riadením. Predpisy sú voči tejto špirálovej nestabilite relatívne benevolentné. Pokiaľ je doba nárastu na dvojnásobok 20 sekúnd a viac, je táto špirálová nestabilita prípustná.

Stranový (kymácaý) pohyb, v leteckej praxi je nazývaný aj ako „Dutch-roll“. V tomto prípade sa periodicky mení klonenie, bočenie a zatačanie. Spravidla sa jedná o pomerne rýchla kmitavý pohyb. Pre dobré letové vlastnosti sa požaduje, aby boli tieto stranové kmity dobre tlmené a ďalej sa požaduje, aby počet kmitov do utlmenia amplitúdy na 1/10 nepresiahol 7 kmitov.

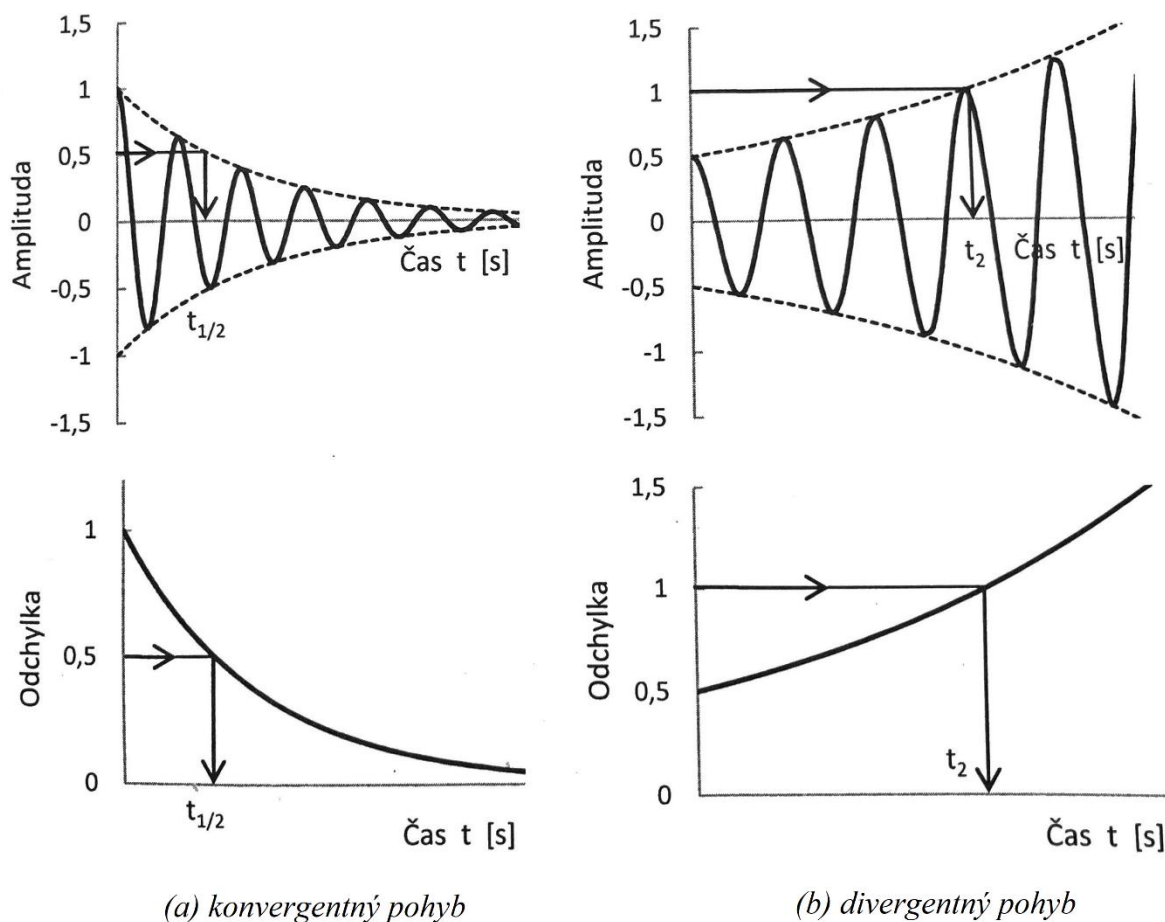
O tom, ktorá z odozvy nastane po poruche rovnovážneho režimu letu závisí na vzájomnej väzbe a pomere medzi priečnou a smerovou statickou stabilitou letúna. Pre dosiahnutie dobrých letových vlastností je potrebné aby boli bočivo-klonivá derivácia $C_{l\beta}$ a bočivo-zatačivá derivácia $C_{n\beta}$ vo vhodnom vzájomnom pomere. Ak je letún veľmi smerovo staticky stabilný v porovnaní s priečnou statickou stabilitou, potom je letún náchylný k špirálovej nestabilite. V opačnom prípade, keď letún vykazuje väčšiu mieru priečnej statickej stability oproti smerovej statickej stabilite, potom vzniká kymácajúce stranové kmitanie typu „Dutch-roll“. Ak sa nedá prirodzene eliminovať kmitanie „Dutch-roll“, používa sa v tomto prípade tlmič bočných kmitov. [22]

5.1.3 Kvantitatívne kritéria dynamickej stability letúna

Najviac používaným kritériom na určenie miery stability je čas do útlmu na jednu polovicu $t_{1/2}$, ktorý hovorí o konvergentnej odozve a opačne, pri divergentnej odozve, zas pracujeme s časom potrebným na zdvojenie amplitúdy t_2 . Nezanedbateľným kritériom je takisto počet kmitov, ktorými sa amplitúda utlmí na jednu polovicu $N_{1/2}$, čo používame pri konvergentnom pohybe. Pri divergentnom pohybe zas hovoríme o počte kmitov, počas ktorých sa odchýlka (amplitúda) zväčší na dvojnásobok pôvodnej hodnoty. Ako doplnkové kritéria môžeme považovať logaritmický dekrement útlmu θ alebo pomerný útlm kmitania ζ .

V praxi stačí na učenie konvergentného alebo divergentného pohybu pracovať iba s časom do útlmu na jednu polovicu, nakoľko pri divergentnom pohybe bude tento čas naberať záporné hodnoty ($t_{1/2} < 0$). Takto stanovený čas s kladným znamienkom opisuje dobu trvania nárastu amplitúdy resp. odchýlky aperiodickej odozvy na dvojnásobok t_2 .

Konvergentný pohyb nastane po počiatočnej poruche, keď na letún začnú pôsobiť vratné momenty, ktoré sú avšak tak silné, že pri prekmitávaní na opačnú stranu zosilňujú a tým spôsobujú postupný nárast amplitúdy. Po stránke statickej stability je letún stabilný ale z hľadiska dynamickej stability je letún nestabilný, nakoľko nedokáže obnoviť pôvodný režim letu bez zásahu do ovládania. [23]

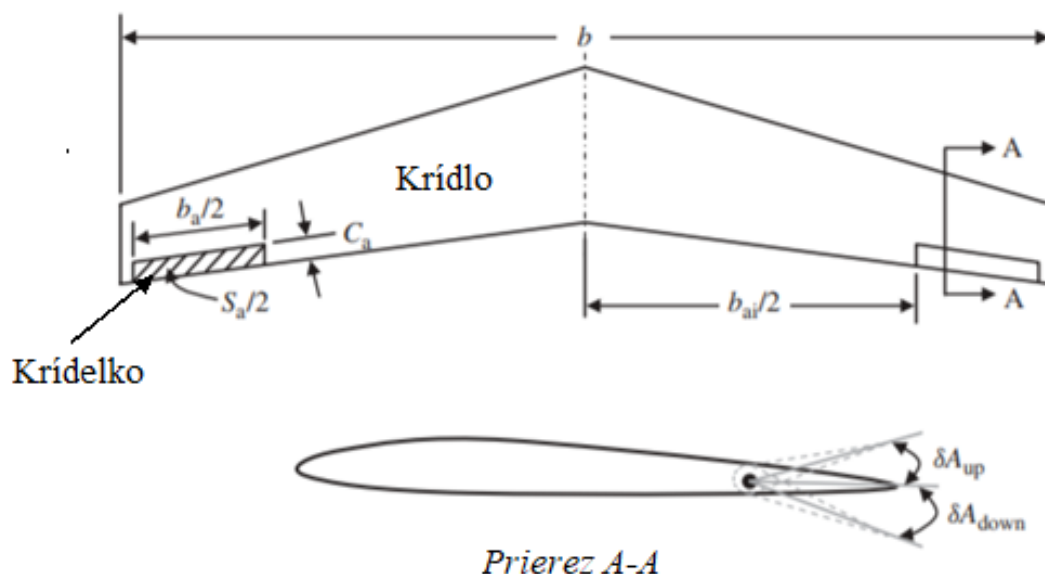


Obr. 5-3 Definícia času $t_{1/2}$, potrebného na utlmenie odchýlky alebo amplitúdy na jednu polovicu (a) a definícia času t_2 , potrebného na zvýšenie odchýlky alebo amplitúdy na dvojnásobok [23]

5.2 Ovládacie plochy

5.2.1 Výchylka krídeliek

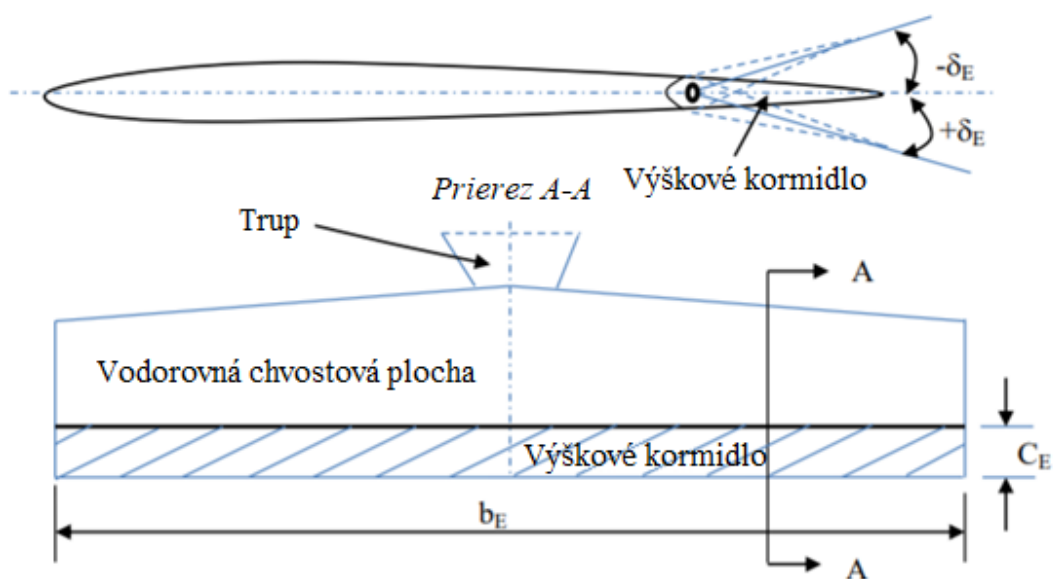
Krídlo je krídlo ovládacia plocha letúna, ktorá priamo ovplyvňuje priečnu riaditeľnosť, tj. klonivý pohyb okolo pozdĺžnej osy, tzv. klonenie. Krídelka sú klapky, ktoré sú väčšinou súčasťou krídel a bývajú umiestnené na odtokových hranách na ich koncoch. Sú znázornené a popísané na obrázku 5-4. Vychylujú sa nahor a nadol, podobne ako výškové kormidlo, ktoré je tiež párové. Rozdiel je v tom, že krídelka sa vychylujú protichodne. Ak chceme zatočiť resp. kloniť doľava, musí sa ľavé krídelko vychýliť nahor od rovnovážnej polohy a pravé zas naopak, smerom nadol. Letún sa začne točiť na základe nerovnomernej veľkosti pôsobiaceho vztlaku na jednotlivých koncoch krídel. Vzniká tak klonivý moment M_x , ktorý je priamym následkom zmeny pôsobiacich síl na letún. Veľkosť výsledného klonivého momentu zas závisí od nasledujúcich parametrov: veľkosť plochy krídeliek, veľkosť ich vychýlenia δ_A (a ich vzdialenosti od strednej aerodynamickej tetivy – SAT)). Účinnosť krídeliek určujeme podľa toho, aký veľký klonivý moment je vyvolaný určitou vychýlkou krídeliek. [24]



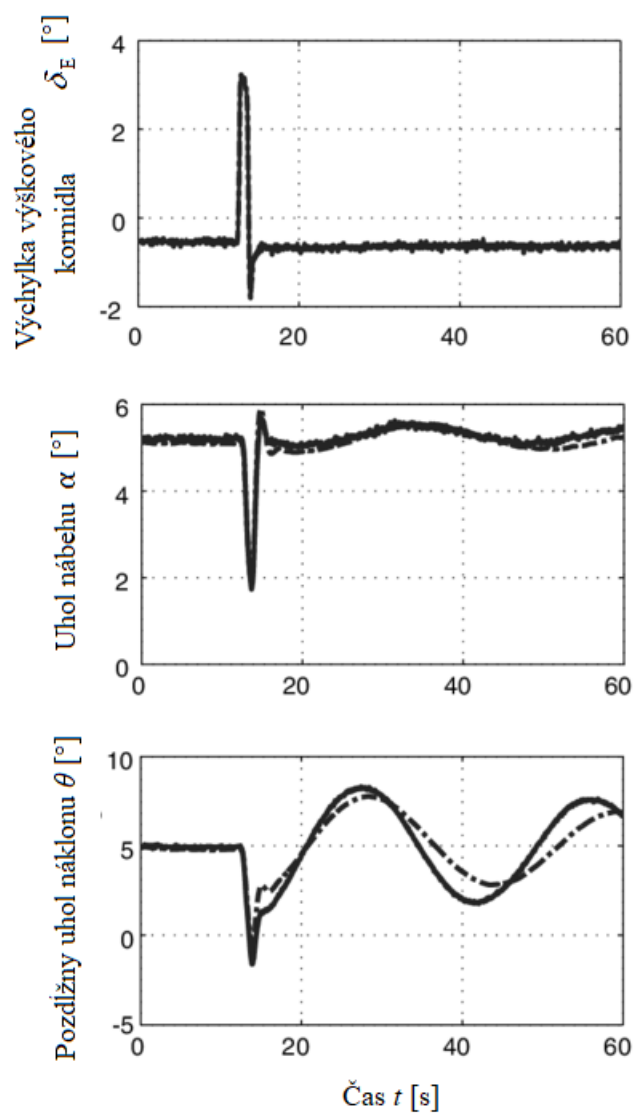
Obr. 5-4 Návrh a popis křídélka [24]

5.2.2 Výchylka výškového kormidla

Medzi hlavné parametre sledované v mojej práci patrí aj výchylka výškového kormidla. Výškové kormidlo je primárna riadiaca plocha umiestnená na zadnej hrane vodorovného stabilizátora resp. kačice a jeho hlavnou funkciou je pozdĺžne riadenie a vyváženie letúna; na druhej strane zas výškové kormidlo iba jemne ovplyvňuje jeho pozdĺžnu stabilitu. Fungujúc na rovnakom mechanizme ako klapka, výškové kormidlo sa vychyluje nahor a nadol, ako je znázornené na obrázku 5-4. Po vychýlení kormidla nastane prehnutie profilu krídla výškového stabilizátora, čo má za následok zmenu koeficientu vztlaku na chvoste C_{Lh} . Tým pádom je pokles alebo naopak nárast vztlaku na chvostovej ploche ovplyvňovaný kormidlom a to v akej miere závisí od jeho výchylky (δ_E) voči vodorovnej polohe. Zmeny polohy výškového kormidla tak majú za priamy následok zmenu klopiačeho momentu. Priebeh závislosti výškového kormidla a pozdĺžneho uhlu sklonu letúna môžeme vidieť na obrázku 5-5. [24]



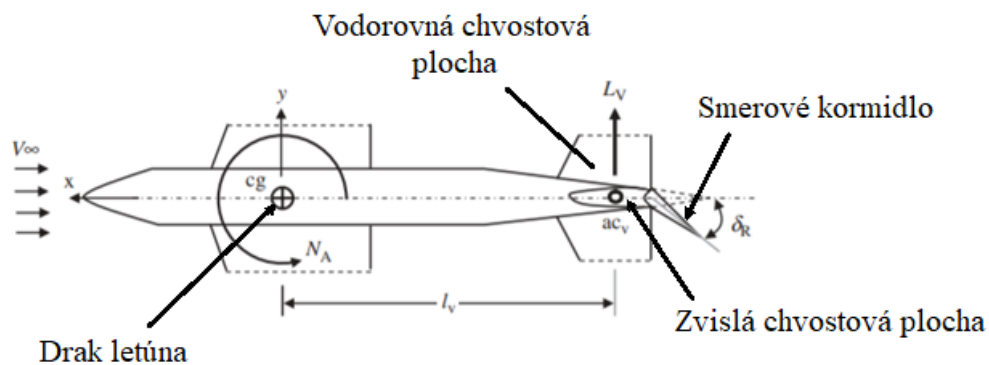
Obr. 5-5 Nákres a popis výškového kormidla [24]



Obr. 5-6 Priebeh závislostí pozdĺžneho uhlu náklonu, uhlu nábehu a výchylky výškového kormidla v čase [25]

5.2.3 Výchylka smerového kormidla

Smerovým kormidlom ovládame smerový pohyb letúna okolo zvislej osy, čiže zatáčanie. Smerové kormidlo býva zvyčajne spolu s vertikálnym stabilizátorom umiestnené na zvislej chvostovej ploche letúna. Je to jedna klapka, umiestnená na odtokovej hrane, ktorá je pohyblivá do strán a tým vytvára točivý moment. Na rozdiel od výškového kormidla a krídeliek, smerové kormidlo je iba jedno a nemá pár. Existujú však aj letúny s párovým smerovým kormidlom, ako napríklad Antonov 225 Mriya alebo Lockheed Constellation, ktorý je vybavený až tromi smerovými kormidlami. Ovládanie funguje jednoducho, ak kormidlo vychýlime (δ_R) smerom doprava, vytvoríme tým točivý moment a letún zatočí smerom doprava. Žiadaný moment nastane po vychýlení vznikom vztlakovej sily L_V , zobrazenej na obrázku 5-6. [24]



Obr. 5-7 Náskres a popis smerového kormidla [24]

6 Analýza letu s programom ArduPilot

Na zber dát a sledovanie letu je možné využiť aj systém ArduPilot, ktorý vie byť nápomocný pri sledovaní a skúmaní danej cesty (v našom prípade letu) vďaka multiplatformnému využitiu na ľubovoľnom pohybujúcom sa prostriedku. My sme ho využili na sledovanie letu a kontrolu správnosti vybraných údajov, ktoré do neho odosiela simulátor.

6.1 ArduPilot

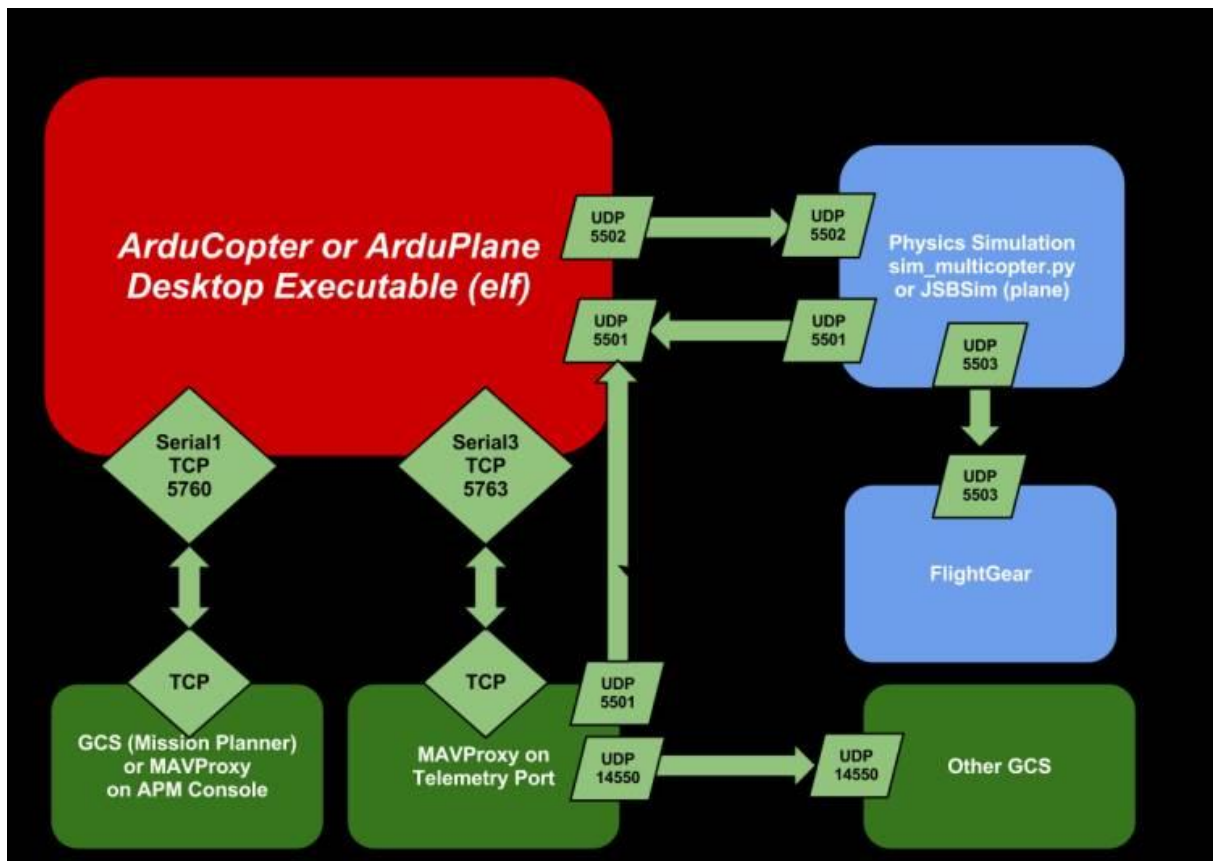
Projekt *Ardupilot* je spoľahlivý open-source počítačový systém autopilota založený v roku 2009. Odvtedy je vyvíjaný tímom inžinierov, akademikov a vedcov a vie nám poskytnúť škálu údajov na takmer každé dostupné vozidlo, od letúnov až po ponorky a poskytuje nástroje na zaznamenávanie údajov a ich analýzu a simuláciu.

Aby systém *Ardupilot* mohol pracovať, musí sa skladať z 3 hlavných častí a to sú hardware, firmware a software. Hardware tvoria počítačové dosky, pozostávajúce z jedného alebo viacerých mikro-procesorov pripojených k periférnym senzorom používaných k navigácii. Medzi tieto senzory musia patriť aspoň gyroskopy a akcelerometre typu MEMS, zvyčajne sa navyše používajú aj senzory barometrického výškomeru, kompasu, GPS či aj optické snímače prietoku alebo laserové a sonarové výškomery a diaľkomery. Pod pojmom firmware označujeme kód bežiaci na príslušnej počítačovej doske na príslušnom vozidle. Na výber sú firmware-y v nasledujúcich kategóriách: Plane, Copter, Rover, Sub a AntennaTracker. Ako z daných názvov vyplýva, typ firmware-u si vyberáme podľa typu zvoleného dopravného prostriedku. Software tvorí užívateľské rozhranie na ovládanie počítačovej dosky, nazýva sa aj ako tzv. Ground Control Station (ďalej ako GCS). GCS umožňuje používateľovi nastavenie, konfiguráciu, testovanie a úpravu vybraného vozidla. Medzi GCS sa radí viacero softwarových programov; sú nimi MissionPlanner (ktorý bol ako prvý vytvorený), APM Planner alebo QGroundControl. Software je dostupný na platformy Windows, MacOS, Linux a aj iOS a Android. [26]

Auto-pilotový program *Ardupilot* je nainštalovaný na viac ako milióny vozidiel a mimo laických používateľov sa používa aj na testovaniach u americkej kozmickej agentúry NASA, amerického výrobcu lietadiel Boeing alebo technologickej korporácie Intel. [27]

6.2 Software-in-the-loop (SITL)

Ardupilot ako systém pozostávajúci z troch prvkov potrebuje na zber dát a ovládanie počítačovú dosku, ktorá je umiestnená na skúmanom vozidle. V mojej práci ale budem skúmať funkciu ako zisťovať dáta priamo zo mnou zvoleného simulátora (X-Plane). Kvôli tomu ponúka ArduPilot možnosť pracovať s dátami v tzv. režime “software-in-the-loop” (ďalej označené ako SITL). V tomto režime tým pádom nie je nutné mať fyzicky prítomný hardware (počítačovú dosku) priamo na palube, nakoľko potrebné dáta generuje samotný simulátor. [28]



Obr. 6-1 Stavebná štruktúra programu ArduPilot v režime SITL [28]

6.3 MavProxy

MavProxy je plne funkčná GCS, navrhnutá ako najjednoduchšia, prenosná a rozširiteľná GCS navrhnutá na akýkoľvek autonómny systém podporujúci protokol MAVLink – ako napríklad práve ArduPilot. Vo svojej podstate ide o jednoduchý softvér, bežiaci na báze príkazového riadku, používaný najmä vývojármi. Môže byť rozšírený pomocou prídavných, tzv. “add-on“ modulov alebo doplnený resp. prepojený s inou GCS ako napríklad MissionPlanner, APM Planner 2 alebo QGroundControl aby ponúkol užívateľovi grafické užívateľské rozohranie.

Medzi jeho kľúčové vlastnosti patrí prenos dát cez sieť z letúna alebo simulátoru pomocou UDP a ďalej tieto dáta dokáže odosielať do iných GCS. Používa sa často na testovanie nových zapojení, najčastejšie práve v zostave SITL. [29]

6.4 MissionPlanner

V mojej práci som sa rozhodol využiť práve softwarovú sekciu programu Ardupilot nazvanú MissionPlanner, ktorá slúži ako kľúčový prvok celej sústavy, nakoľko predstavuje východiskové rozohranie medzi užívateľom a hardwarom. Ide o najbežnejšie používanú GCS v rámci programu ArduPilot. MissionPlanner slúži ako prostriedok na konfiguráciu a ovládanie. Pomocou tejto aplikácie vieme následne monitorovať, ovládať a plánovať let. MissionPlanner takisto dokáže okrem iného načítať firmware na počítačovú dosku (hardware), stiahnuť a analyzovať dáta po každej zakončenej misii (letu) a s využitím internetových máp

(napríklad Google Maps) umožňuje naplánovať, uložiť a načítať autonómne misie do autopilota jednoduchým zadáním a následným kliknutím na zvolený bod na mape. MissionPlanner je avšak zatiaľ dostupný len pre počítače bežiacie na operačnom systéme Microsoft Windows. [30]



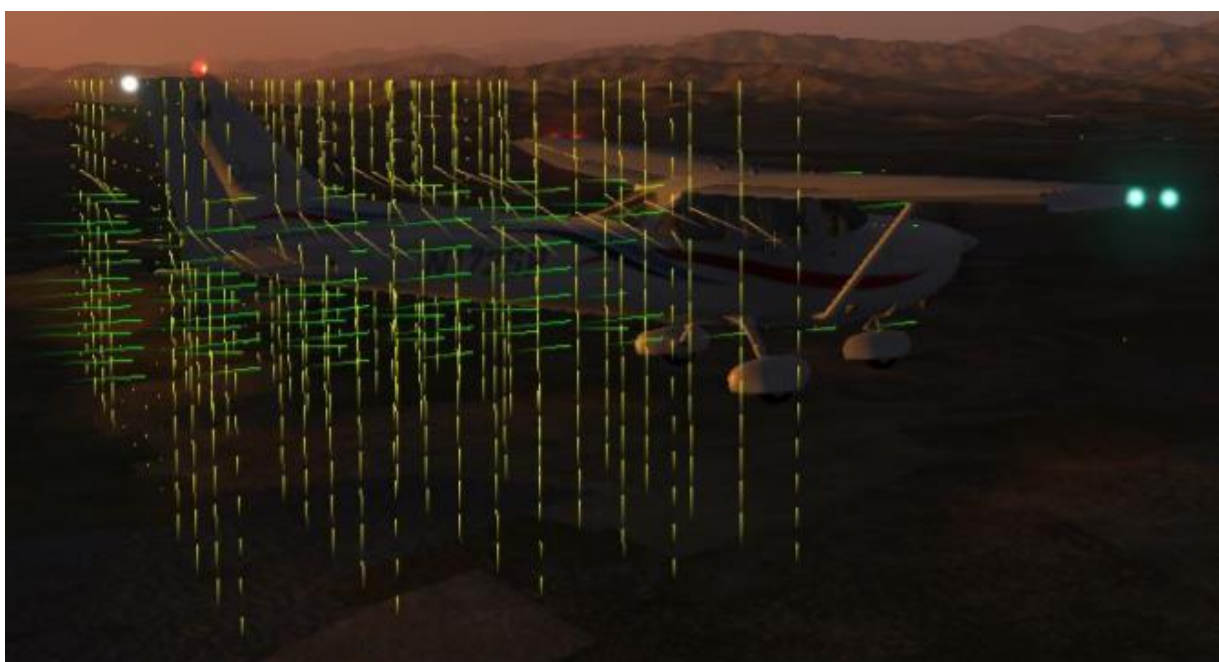
Obr. 6-2 Ukážka sledovania letu v softwari Mission Planner [30]

7 Experimentálny let v X-plane

7.1 Technológia simulácie

Modely letúnov v simulátore X-Plane využívajú technológiu Blade Element Theory, ktorej princíp sa využije tak, že sa letún rozdelí na niekoľko menších častí a na každú časť sa vypočíta veľkosť pôsobiaceho vztlaku a odporu. X-Plane vykonáva výpočet prietoku vzduchu desať krát za sekundu, čo umožňuje simulovať let.

Ilustračný model letúna v X-Plane je zobrazený na obrázku 7-1. Zelené čiary znázorňujú vztlakové sily pôsobiace na jednotlivé segmenty lietadla, pričom platí, že čím je čiara dlhšia, tým pôsobí väčšia sila. Žlté čiary zas indikujú vztlakovú silu z vertikálnych ovládacích plôch. Červené čiary označujú veľkosť odporu.



Obr. 7-1 Čiary znázorňujúce veľkosť vztlaku a odporu v simulátore X-Plane [19]

7.2 Skúška na letúne Cessna 172SP

Cieľom našej letovej skúšky je experimentálne určiť odozvu letúna s pevným riadením na rýchly impulz do orgánu riadenia (výškové kormidlo) a jeho vplyv na dynamickú stabilitu, konkrétne na rýchle a fugoidné pozdĺžne kmity lietadla.

Podmienky skúšky:

- Počasie pre podmienky VFR, bez turbulencie
- Teplota v 300 ft AGL = 13°C
- Rýchlosť = 80 uzlov
- Miesto skúšky – ATZ Křižanov - letisko Křižanov (LKKA)
- Lietadlo je v konfigurácii podľa letovej príručky
- Maximálna vzletová hmotnosť (MTOW):
 1. Prvý variant ráta s MTOW 1081kg

2. Druhý variant ráta s MTOW 1068.5kg

Postup:

Postup pred letom je všeobecný a bude platiť pred každým testovacím letom v simulátore. Pre každý testovací let bude následne rozpísaný návod na postup pri jednotlivjej začatej simulácii letu tak, aby skúška odrážala nami požadované podmienky, pozorovania relevantných údajov a splnila tak tým svoj účel.

- Postup pred simuláciou letu
 1. Otvoríme simulátor X-Plane.
 2. V menu vyberieme letún pre náš let – v našom prípade lietadlo Cessna 172SP.
 3. Ako počiatočnú lokalitu vyberieme medzinárodné letisko Brno – Tuřany (LKTB).
 4. Následne nastavíme vhodné meteorologické podmienky pre VFR let bez turbulencie.
 5. Pre vhodné rozloženie hmotnosti podľa našich podmienok, nastavíme v simulátore požadované množstvo paliva a užitočného zaťaženia pre náš let.
 6. Skontrolujeme naše výstupné nastavenia a spustíme simuláciu.

Testovacie lety:

1. Let – zmena výchylky výškového kormidla
 - MTOW 1081 kg
2. Let – zmena výchylky výškového kormidla
 - MTOW 1068.5 kg

Postup počas simulácie letu

1. Vzlet z letiska Brno - Tuřany (LKTB).
2. Po vzlete pokračujeme po naplánovanej trase na letisko Křiřanov (LKKA).
3. Pred priletom do ATZ Křiřanov, lietadlo dostaneme do vodorovnej, vyváženej polohy, rýchlosť udržujeme na 80 uzloch.
4. Letún udržujeme vo vodorovnom lete na potrebnej výchylke výškového kormidla.
5. Pred nasledujúcim krokom odporúčam zmeniť nastavenie ovládania výškového kormidla z ovládania pomocou hlavicou joysticku na ovládanie iným prvkom, napr. tlačidlom. Dôvodom je to, že pri udržiavaní pozdĺžneho a vertikálneho smeru musíme s joystickom manipulovať, čo by mohlo potenciálne viesť aj k nechcenému zásahu do priečneho riadenia a narušenia pravidelnosti kmitania.
6. Po prekročení ATZ pulzovo vychýlime výškové kormidlo na plnú, kladnú alebo zápornú, výchylku a vzápätí ho hneď vrátime do neutrálnej polohy.
7. Do riadenia výškového kormidla nezasahujeme, udržujeme iba stranový a priečny smer,
8. Po utlmení kmitania a následnej stabilizácie lietadla, za predpokladu ukončenia testovania, môžeme pristáť na letisku Křiřanov (LKKA).

7.3 Vyhodnotenie merania

Na určenie presnosti simulátoru sme sa rozhodli oprieť o aerodynamické vlastnosti fyzikálneho modelu letúna, presnejšie sme sa zoberali dynamickou stabilitou a odozve letúna na vybudené kmity a ich priebeh v čase. Kmitanie sme podmienili náhlymi impulzmi do riadenia ovládacích plôch, konkrétne výchylky výškového kormidla. Nami vyvolané rýchle a fugoidné kmitanie sme následne mohli vidieť na grafe vybraných sledovaných parametrov – v našom prípade to boli čas t , uhol nábehu α a odchýlka od dráhy letu od referenčného režimu letu $\Delta\gamma$, ktorú sme síce priamo nemerali, ale získali sme ju odčítaním pozdĺžneho uhlu náklonu letúna θ od uhlu nábehu. Vďaka tomuto kroku sme mohli lepšie pozorovať jav fugoidných kmitov v čase.

Fugoidné kmity sme mohli pozorovať v správaní uhlu sa odchýlky $\Delta\gamma$ v čase zobrazených v grafe, kde sme zaznamenané údaje prispôbovali grafickou metódou tak, aby maximálna počiatočná amplitúda začínala na začiatku súradnicového systému. Tento krok bol potrebný k správne určenie regresnej funkcie z vrcholov jednotlivých kmitov pomocou programu Microsoft Excel. Aby sme krivku prechádzajúcu cez vrcholy mali čo najpresnejšie určenie, tak sme kladnú časť grafu ešte prekryli hodnotami $\Delta\gamma$ v absolútnej hodnote. Taký istý postup sa aplikoval aj na pozorovaní rýchlych kmitov, ktoré sa ale skúmali na priebehu uhlu nábehu v čase.

Z krivky regresnej funkcie a jej zápisu sme potom dopočítaním cez logaritmické rovnice určili jedno z hlavných skúmaných kritérií dynamickej stability – čas útlmu amplitúdy na jednu polovicu. Následne sa z príslušného vzorca na výpočet počtu kmitov na útlm amplitúdy na jednu polovicu určila jeho hodnota. Zo zistených hodnôt sme ako doplnkové kritérium vypočítali hodnoty logaritmického dekrementu útlmu pre každý let.

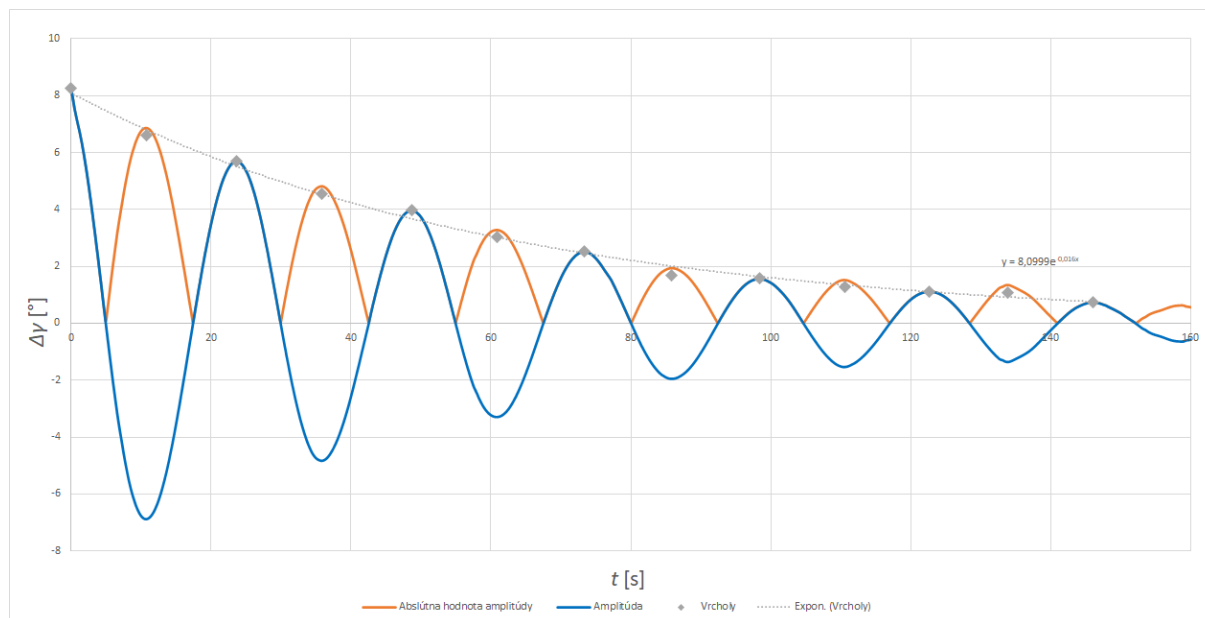


Obr. 7-1 Letún Cessna 172SP počas jedného z experimentálnych letov v simulátore X-Plane

7.4 Let s MTOW 1081 kg

7.4.1 Analýza fugoidálnych kmitov

Graf sledovaných údajov:



Obr. 7-3 Priebeh konvergentného pohybu fugoidných kmitov sledovaných v čase v závislosti na odchýlke od dráhy letu od referenčného režimu letu $\Delta\gamma$

Vypočítaná rovnica z grafu a výpočet času a počtu kmitov na útlm na jednu polovicu:

$$y = 8,0999e^{-0,016x}$$

$$y = 8,0999e^{-0,016 \cdot 0} = 8,0999$$

$$\ln \frac{8,0999}{2} = \ln 8,0999 - 0,016x$$

$$x = - \frac{\ln \frac{8,0999}{2} - \ln 8,0999}{0,016}$$

$$x = t_{1/2} = 43,32169878 \text{ s}$$

$$N_{1/2} = \frac{t_{1/2}}{T}$$

$$N_{1/2} = \frac{43,32169878}{23,73743}$$

$$N_{1/2} = 1,825037453$$

Výpočet logaritmického dekrementu útlmu:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(1/2)}{\delta}$$

$$\delta = -\frac{1}{t_{1/2}} * \ln 2$$

$$\delta = -\frac{1}{43,32169878} * \ln 2$$

$$\delta = -0,015999999$$

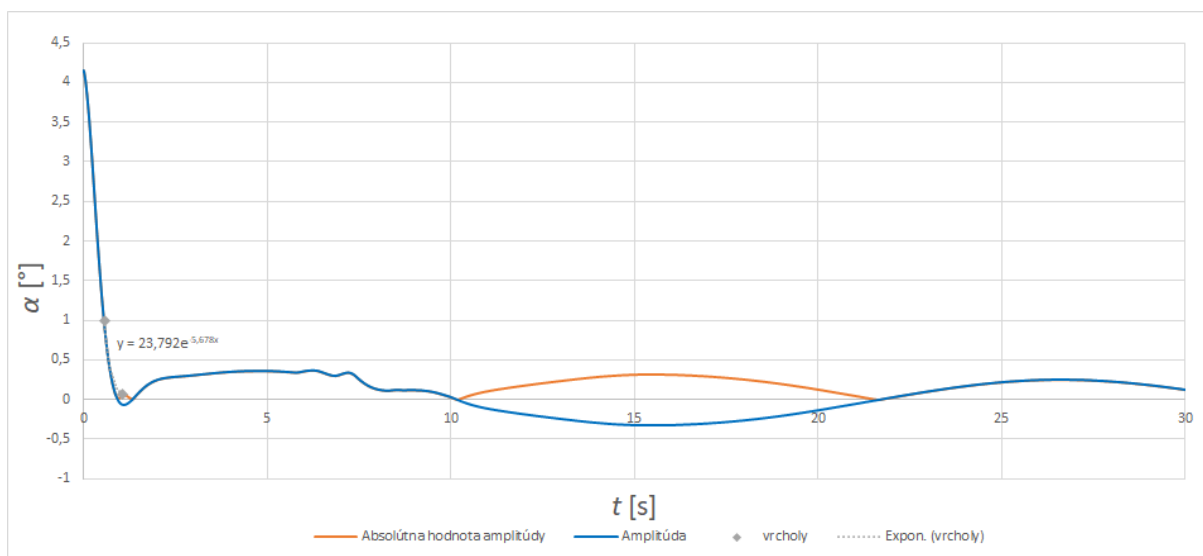
$$\vartheta = -\delta T$$

$$\vartheta = -0,015999999 * 23,7374$$

$$\vartheta = 0,379798389$$

7.4.2 Analýza rýchlych kmitov

Graf sledovných údajov:



Obr. 7-4 Priebeh konvergentného pohybu rýchlych kmitov sledovaných v čase v závislosti na uhle nábehu

Vypočítaná rovnica z grafu a výpočet času a počtu kmitov na útlm na jednu polovicu:

$$y = 23,792e^{-5,678x}$$

$$y = 23,792e^{-5,678*0} = 23,792$$

$$\ln \frac{23,792}{2} = \ln 23,792 - 5,678x$$

$$x = - \frac{\ln \frac{23,792}{2} - \ln 23,792}{5,678}$$

$$x = t_{1/2} = 0,1220759388 \text{ s}$$

$$N_{1/2} = \frac{t_{1/2}}{T}$$

$$N_{1/2} = \frac{0,1220759388}{0,7666}$$

$$N_{1/2} = 0,1592433326$$

Výpočet logaritmického dekrementu útlmu:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(1/2)}{\delta}$$

$$\delta = -\frac{1}{t_{1/2}} * \ln 2$$

$$\delta = -\frac{1}{0,1220759388} * \ln 2$$

$$\delta = -5,678$$

$$\vartheta = -\delta T$$

$$\vartheta = -5,678 * 0,7666$$

$$\vartheta = 4,3527548$$

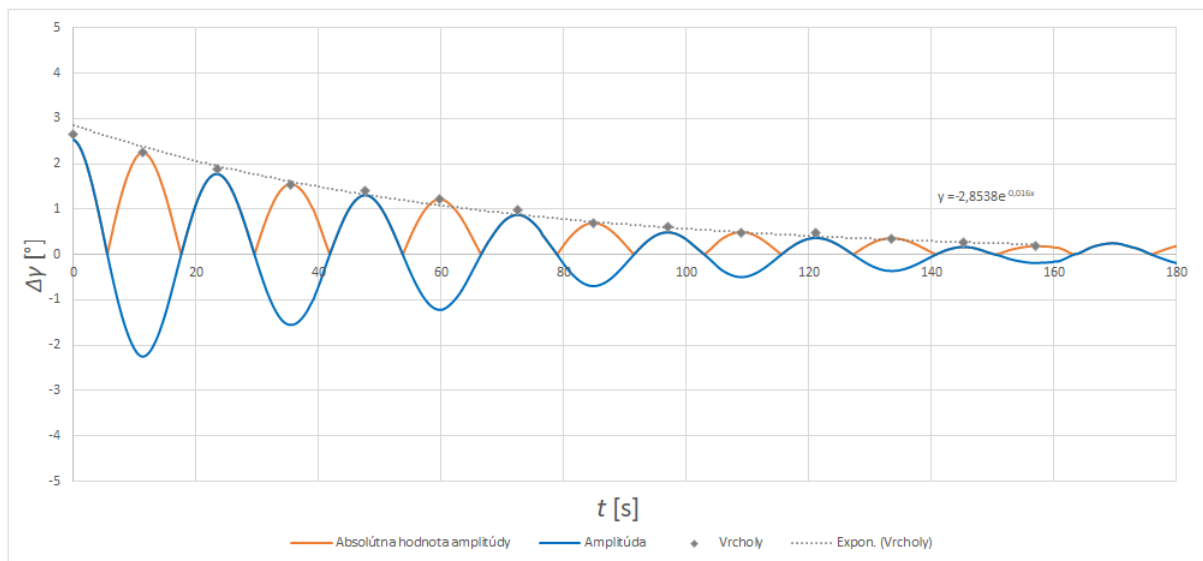
7.4.3 Výsledky

Typ kmitania	$t_{1/2}$	$N_{1/2}$	ϑ	T
	[s]	[1]	[1]	[s]
Fugoidné kmity	43,3217	1,8250	0,3798	23,7374
Rýchle kmity	0,1221	0,1592	4,3528	0,7666

7.5 Let s MTOW 1068.5 kg

7.5.1 Analýza fugoidálnych kmitov

Graf sledovaných údajov:



Obr. 7-5 Priebeh konvergentného pohybu fugoidálnych kmitov sledovaných v čase v závislosti na odchýlke od dráhy letu od referenčného režimu letu $\Delta\gamma$

Vypočítaná rovnica z grafu a výpočet času a počtu kmitov na útlm na jednu polovicu:

$$y = 2,8538e^{-0,016x}$$

$$y = 2,8538e^{-0,016 \cdot 0} = 2,8538$$

$$\ln \frac{2,8538}{2} = \ln 2,8538 - 0,016x$$

$$x = - \frac{\ln \frac{2,8538}{2} - \ln 2,8538}{0,016}$$

$$x = t_{1/2} = 43,32169878 \text{ s}$$

$$N_{1/2} = \frac{t_{1/2}}{T}$$

$$N_{1/2} = \frac{43,32169878}{23,4000}$$

$$N_{1/2} = 1,851354649$$

Výpočet logaritmickeho dekrementu útlmu:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(1/2)}{\delta}$$

$$\delta = -\frac{1}{t_{\frac{1}{2}}} * \ln 2$$

$$\delta = -\frac{1}{43,32169878} * \ln 2$$

$$\delta = -0,015999999$$

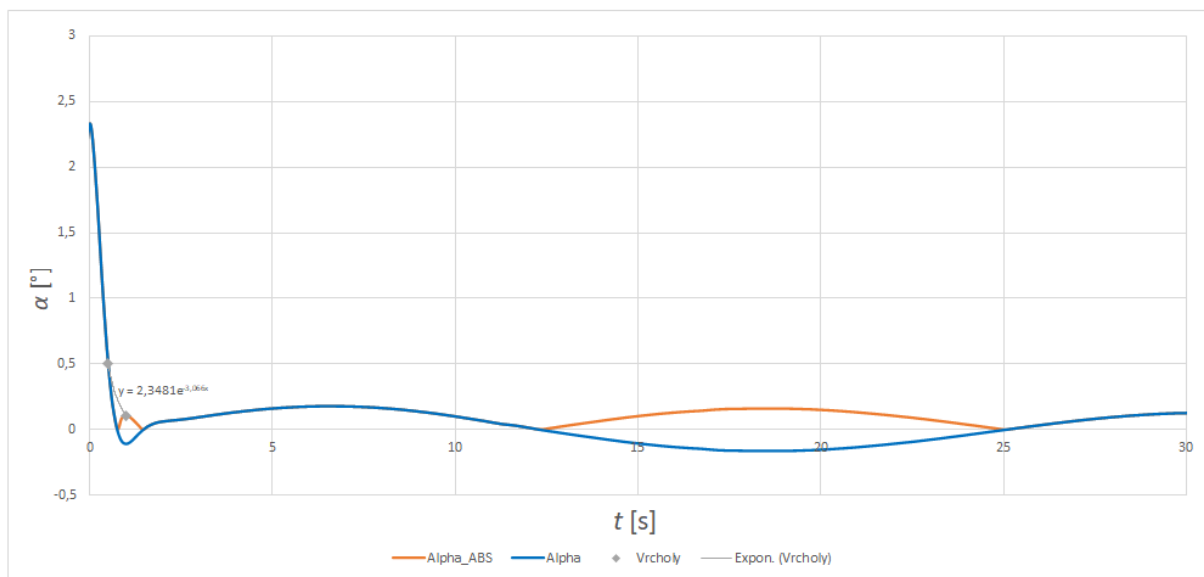
$$\vartheta = -\delta T$$

$$\vartheta = -0,015999999 * 23,400$$

$$\vartheta = 0,374399990$$

7.5.2 Analýza rýchlych kmitov

Graf sledovaných údajov:



Obr. 7-6 Priebeh konvergentného pohybu rýchlych kmitov sledovaných v čase v závislosti na uhle nábehu

Vypočítaná rovnica z grafu a výpočet času a počtu kmitov na útlm na jednu polovicu:

$$y = 2,3481e^{-3,066x}$$

$$y = 2,3481e^{-3,066*0} = 2,3481$$

$$\ln \frac{2,3481}{2} = \ln 2,3481 - 3,066x$$

$$x = -\frac{\ln \frac{2,3481}{2} - \ln 2,3481}{3,066}$$

$$x = t_{1/2} = 0,2260754014 \text{ s}$$

$$N_{1/2} = \frac{t_{1/2}}{T}$$

$$N_{1/2} = \frac{0,2260754014}{1,3946}$$

$$N_{1/2} = 0,1621077021$$

Výpočet logaritmického dekrementu útlmu:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(1/2)}{\delta}$$

$$\delta = -\frac{1}{\frac{t_1}{2}} * \ln 2$$

$$\delta = -3,065999999$$

$$\vartheta = -\delta T$$

$$\vartheta = -3,065999999 * 1,3946$$

$$\vartheta = 4,2758$$

7.5.3 Výsledky:

Typ kmitania	$t_{1/2}$	$N_{1/2}$	ϑ	T
	[s]	[1]	[1]	[s]
Fugoidné kmity	43,3217	1,8514	0,3744	23,4000
Rýchle kmity	0,2261	0,1621	4,2758	1,3946

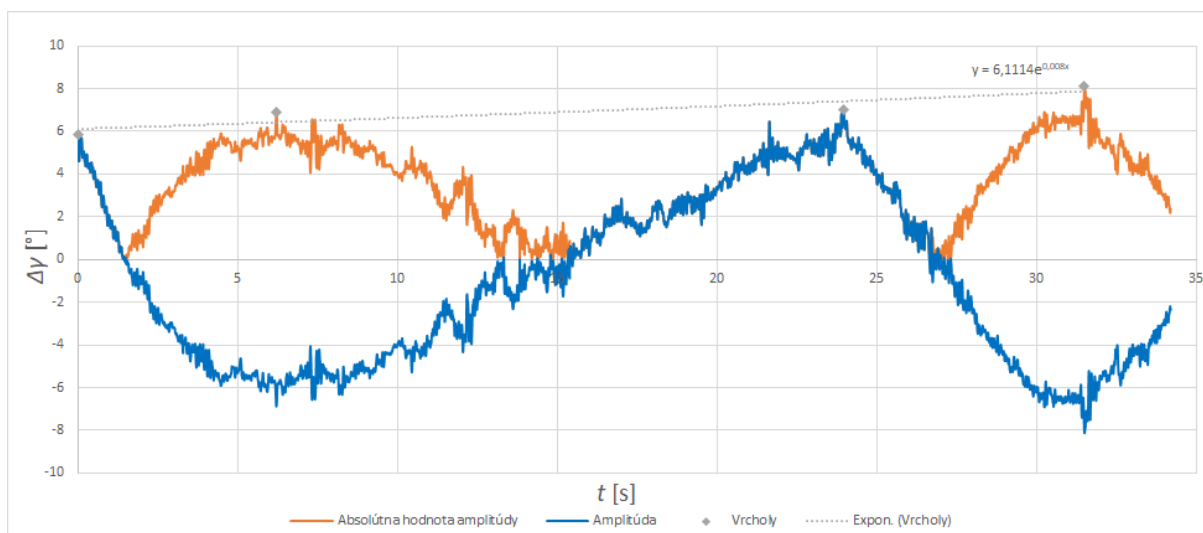
8 Meranie z reálneho prostredia

Údaje vyhodnocujeme analogicky ako v predchádzajúcej kapitole 7.

8.1 Let s MTOW 1068,5 kg

8.1.1 Analýza fugoidálnych kmitov

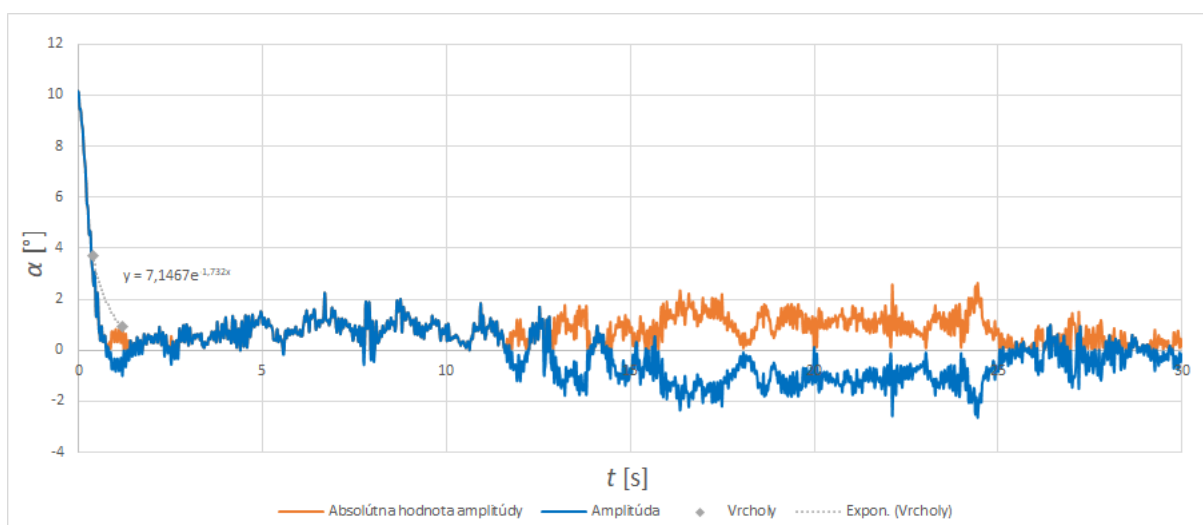
Graf sledovaných údajov:



Obr. 8-1 Priebeh pohybu fugoidných kmitov sledovaných v čase v závislosti na odchýlke od dráhy letu od referenčného režimu letu $\Delta\gamma$

8.1.2 Analýza rýchlych kmitov

Graf sledovaných údajov:

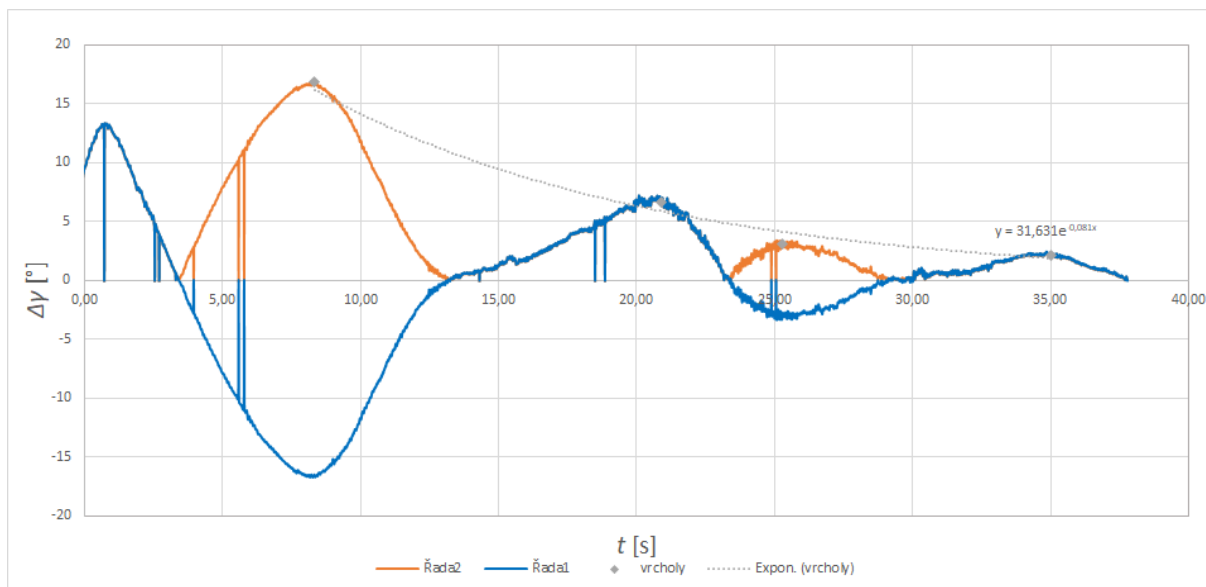


Obr. 8-2 Priebeh konvergentného pohybu rýchlych kmitov sledovaných v čase v závislosti na uhle nábehu

8.2 Let s MTOW 1081 kg

8.2.1 Analýza fugoidálnych kmitov

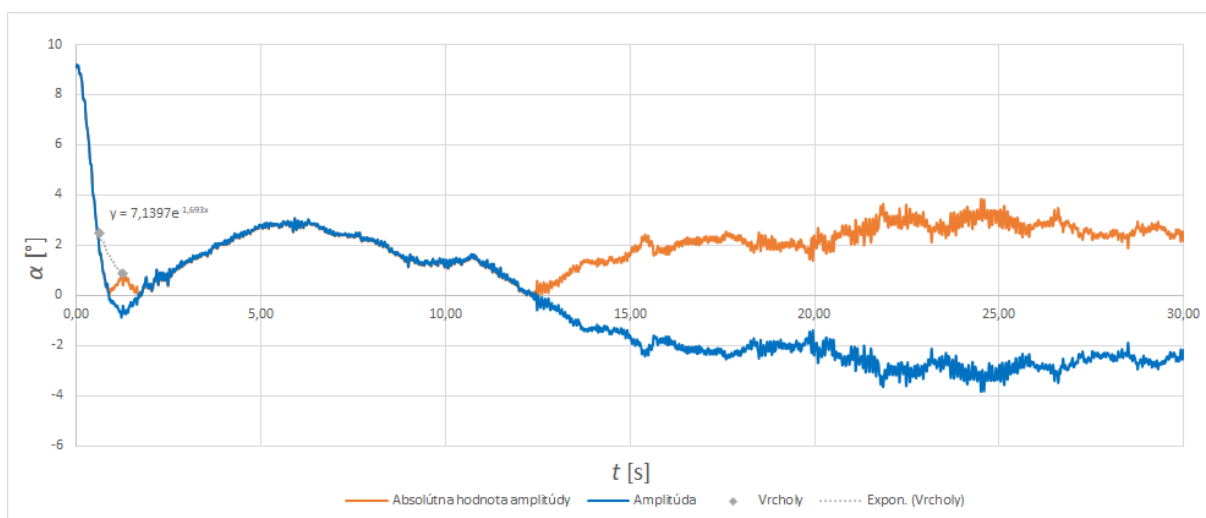
Graf sledovaných údajov:



Obr. 8-3 Priebeh konvergentného pohybu fugoidných kmitov sledovaných v čase v závislosti na odchýlke od dráhy letu od referenčného režimu letu $\Delta\gamma$

8.2.2 Analýza rýchlych kmitov

Graf sledovaných údajov:



Obr. 8-4 Priebeh konvergentného pohybu rýchlych kmitov sledovaných v čase v závislosti na uhle nábehu

8.2.3 Výsledky

Let s MTOW 1081 kg:

Typ kmitania	$t_{1/2}$	$N_{1/2}$	ϑ	T
	[s]	[1]	[1]	[s]
Fugoidné kmity	8,5574	0,4272	1,6224	20,0300
Rýchle kmity	0,4094	0,2527	2,7427	1,6200

Let s MTOW 1068.5 kg:

Typ kmitania	$t_{1/2}$	$N_{1/2}$	ϑ	T
	[s]	[1]	[1]	[s]
Fugoidné kmity	-86,64339757	-3,6162	-0,1872	23,9600
Rýchle kmity	0,4000	0,3032	2,28624	1,3200

9 Záver:

Vyhodnotenie výsledkov zo skúšobných letov v simulátore X-Plane nám ukázali, že fyzikálno-matematický model letúna Cessna 172SP sa správa po impulznom vychýlení tak, ako sa očakáva podobná reakcia od reálneho letúna v reálnom prostredí.

Z vykreslených grafov si môžeme všimnúť konvergentný priebeh fugoidných a rýchlych kmitov v čase, čo indikuje to, že simulátor dokáže pracovať so stabilitou letúna, čo je kvalitatívne viditeľné na priebehu sledovaných kritérií z nameraných letových údajov.

Pri fugoidných kmitoch v oboch testovacích hmotnostných konfiguráciách boli výsledné hodnoty dypočítaných kritérií dynamickej stability pre letún Cessna 172SP, tj. čas útlmu amplitúdy na jednu polovicu a počet kmitov do útlmu amplitúdy na jednu polovicu približné udávanej hodnote.

Z meraní fugoidných a rýchlych kmitov v reálnom prostredí nevieme s presnosťou získať nami požadované kritériá a tým pádom nedokážeme s istotou potvrdiť konvergentné sa správanie letúna, nakoľko meranie počas reálneho letu nebolo dostatočne dlhé na presné vyhodnotenie typu pohybu. Nami vypočítané hodnoty sa výraznejšie líšia od údajov zo simulátoru a od skutočných hodnôt, hlavne pri pomalých kmitoch. Prispeli k tomu aj vysoké nepravidelné odchýlky medzi pozorovanými hodnotami uhlu nábehu a odchýlky od dráhy letu $\Delta\gamma$.

Na zvýšenie presnosti merania je potrebné použiť sofistikovanejšie metódy na vyhodnotenie ako napríklad vypočítať matematický model letúna a následne zistiť aerodynamické derivácie napríklad identifikačnými metódami.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] *History of Flight Simulator* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://josef.havlik.sweb.cz/timelineenglish.htm>
- [2] STEPHENS, Ian. Review of FlightGear: The Free & Fun Flight Simulator! *Fly Away Simulation* [online]. 2012 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://flyawaysimulation.com/news/4571/>
- [3] SABÁN, Antonio. *GeoFS es un 'Flight Simulator' que puedes jugar desde el navegador totalmente gratis* [online]. 2020 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.genbeta.com/web/geofs-flight-simultor-que-puedes-jugar-navegador-totalmente-gratis>
- [4] ANDERSON, Nels. *Interview With Austin Meyer: Author Of X-Plane* [online]. 2013 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.flightsim.com/vbfs/content.php?13599-Interview-With-Austin-Meyer>
- [5] How X-Plane Works. *X-plane.com* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.x-plane.com/desktop/how-x-plane-works/>
- [6] JOHN, Alex. Navigraph Survey Results 2018: X-Plane 11 on Par with Prepar3D: 2018. *Threshold* [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: [https://www.thresholdx.net/news/navi18#:~:text=In%202016%2C%20it%20had%20about,\(D%20CS\)%20also%20performed%20well.](https://www.thresholdx.net/news/navi18#:~:text=In%202016%2C%20it%20had%20about,(D%20CS)%20also%20performed%20well.)
- [7] ROBERTS, Jennifer. *Differences Between FAA-Certified and Home Version* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.x-plane.com/kb/differences-faa-certified-home-version/>
- [8] *Flight Simulator History* [online]. 2016 [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: <https://flightsim.gl/flight-simulator-history/>
- [9] BEAN, Jean. Microsoft Flight Simulator X: Uh oh! Prepare for Turbulence Ahead! *IGN* [online]. 2006 [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: <https://www.ign.com/articles/2006/12/02/microsoft-flight-simulator-x>
- [10] WARREN, Tom. This Microsoft Flight Simulator video highlights 40 years of PC gaming changes. *The Verge* [online]. 2020 [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2020/9/22/21450859/microsoft-flight-simulator-history-40-years-microsoft-ignite-video>
- [11] BOYLE, Alan. Flight Simulator is back, and it's real: Microsoft uses cloud to help classic franchise soar again. *GeekWire* [online]. 2019 [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: <https://www.geekwire.com/2019/microsoft-flight-simulator-cloud/>
- [12] Lockheed Martin Launches Prepar3D (TM) To Provide Richer Training Experience For Warfighters. *Lockheed Martin* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://news.lockheedmartin.com/2010-05-17-Lockheed-Martin-Launches-Prepar3D-TM-to-Provide-Richer-Training-Experience-For-Warfighters>

- [13] PREPAR3D Product Overview. *Prepar3d.com* [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.prepar3d.com/product-overview/>
- [14] EASA Regulatory Instruments. *SKYbrary* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/EASA_Regulatory_Instruments
- [15] CS-23 - Certifikační specifikace pro letouny kategorie normální, cvičná, akrobatická a pro sběrnou dopravu [online]. 2012 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/dokumenty/predpisy/rozhodnuti-vykonneho-reditele-easa/certifikacni-specifikace/cs-23-letouny-kategorie-normalni-cvicna-akrobaticka-a-pro-sbernou-dopravu/>
- [16] GOYER, Robert. The Evolution of the Cessna 172. *Flying Magazine* [online]. 2012 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.flyingmag.com/aircraft/pistons/evolution-cessna-172/>
- [17] *Cessna 172S Skyhawk Information Manual* [pdf]. 5. Wichita (Kansas, USA): Cessna Aviation Company, 1998 [cit. 2021-01-26]. 172SIM. Dostupné z: <http://aeroatlanta.com/docs/aero-atlanta-c172sp-poh.pdf>
- [18] Cessna 172SP. *AeroWeb.cz* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/letadla/letouny/cessna-172sp>
- [19] ÇETIN, Ender. *System identification and control of a fixed wing aircraft by using flight data obtained from X-Plane flight simulator*. Ankara, 2018. Diplomová práce. Middle East Technical University. Vedoucí práce Prof. Dr. Ali Türker Kutay. Dostupné také z: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12621894/index.pdf>.
- [20] CUTLER, Colin. The 3 Types Of Static And Dynamic Aircraft Stability. *Boldmethod* [online]. 2015 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/3-types-of-static-and-dynamic-stability-in-aircraft/>
- [21] Three Axes of Rotation and Stability. *Flight Literacy* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.flightliteracy.com/three-axes-of-rotation-and-stability/>
- [22] DANĚK, Vladimír. *Základy letu*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-449-4.
- [23] DANĚK, Vladimír. *Mechanika letu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-761-1.
- [24] SADRAEY, Mohammad H. *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*. Wiley, 2012. ISBN 78-1-119-95340-1.
- [25] Elevator singlet verification maneuver responses. *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Elevator-singlet-verification-maneuver-responses_fig4_255448244
- [26] ArduPilot Documentation. *Ardupilot.org* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/ardupilot/>
- [27] ArduPilot :: About. *Ardupilot.org* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/about/>

[28] SITL Simulator (Software in the Loop) — Dev documentation. *Ardupilot.org* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-simulator-software-in-the-loop.html>

[29] MAVProxy documentation - ArduPilot. *Ardupilot.org* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/mavproxy/>

[30] Mission Planner Documentation. *Ardupilot.org* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/planner/>

Zoznam obrázkov

- Obr. 2-1 Screenshot letúna Cessna 172 počas letu v simulátore GEO-FS
- Obr. 2-2 Screenshot z virtuálneho cockpitu lietadla Boeing 737-800 v simulátore Microsoft Flight Simulator X
- Obr. 4-1 Letún Cessna 172SP Skyhawk
- Obr. 4-2 Ovládacie prvky na letúne Cessna 172SP Skyhawk
- Obr. 4-3 Priestorový náčrt letúna Cessna 172SP Skyhawk
- Obr. 5-1 Typy dynamickej stability a ich prejavy
- Obr. 5-3 Definícia času $t_{1/2}$, potrebného na utlmenie odchýlky alebo amplitúdy na jednu polovicu (α) a definícia času t_2 , potrebného na zvýšenie odchýlky alebo amplitúdy na dvojnásobok
- Obr. 5-4 Náčrt a popis krídla
- Obr. 5-5 Náčrt a popis výškového kormidla
- Obr. 5-6 Priebeh závislostí pozdĺžneho uhlu náklonu, uhlu nábehu a výchylky výškového kormidla v čase
- Obr. 5-7 Náčrt a popis smerového kormidla
- Obr. 6-1 Stavebná štruktúra programu ArduPilot v režime SITL
- Obr. 6-2 Ukážka sledovania letu v softwari Mission Planner
- Obr. 7-1 Čiary znázorňujúce veľkosť vztlaku a odporu v simulátore X-Plane
- Obr. 7-2 Letún Cessna 172SP počas jedného z experimentálnych letov v simulátore X-Plane
- Obr. 7-3 Priebeh konvergentného pohybu fugoidných kmitov sledovaných v čase v závislosti na odchýlke od dráhy letu od referenčného režimu letu $\Delta\gamma$
- Obr. 7-4 Priebeh konvergentného pohybu rýchlych kmitov sledovaných v čase v závislosti na uhle nábehu
- Obr. 7-5 Priebeh konvergentného pohybu fugoidálnych kmitov sledovaných v čase v závislosti na odchýlke od dráhy letu od referenčného režimu letu $\Delta\gamma$
- Obr. 7-6 Priebeh konvergentného pohybu rýchlych kmitov sledovaných v čase v závislosti na uhle nábehu
- Obr. 8-1 Priebeh pohybu fugoidných kmitov sledovaných v čase v závislosti na odchýlke od dráhy letu od referenčného režimu letu $\Delta\gamma$
- Obr. 8-2 Priebeh konvergentného pohybu rýchlych kmitov sledovaných v čase v závislosti na uhle nábehu

- Obr. 8-3 Pribeh konvergentného pohybu fugoidných kmitov sledovaných v čase v závislosti na odchýlke od dráhy letu od referenčného režimu letu $\Delta\gamma$
- Obr. 8-4 Pribeh konvergentného pohybu rýchlych kmitov sledovaných v čase v závislosti na uhle nábehu

Zoznam použitých skratiek

ATC	Air Traffic Control
BET	Blade Element Theory
CS	Certifikačná špecifikácia EASA
EGA	Enhanced Graphics Adapter
EASA	Európska agentúra pre bezpečnosť v letectve
EUROCAE	Európska organizácia pre vybavenie civilného letectva
FAA	Federal Aviation Authority
FSX	Flight Simulator X
GCS	Ground Control Station
GPS	Global Positioning System
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MTOW	Maximum Take-Off Weight
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SITL	Software-in-the-loop
SAT	Stredná aerodynamická tetiva
UDP	User Diagram Protocol

Zoznam použitých symbolov a značiek

C_{Lh}	súčiniteľ vztlaku na chvoste
$N_{1/2}$	počet kmitov do útlmu amplitúdy na jednu polovicu
$t_{1/2}$	čas útlmu amplitúdy kmitov na polovicu
T	perióda kmitania
α	uhol nábehu letúna
$\delta_A, \delta_E, \delta_R$	výchylka krídelka, výškového kormidla a smerového kormidla
ϑ	logaritmický dekrement útlmu kmitania
γ	uhol dráhy letu
θ	pozdlžny uhol sklonu letúna